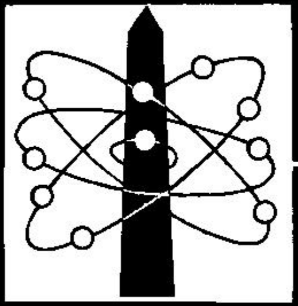
van valkenburgh
nooger & neville inc.

electricidad básica



MARCOMBO BOIXAREU EDITORES

COMMON-CORE

Serie de manuales de Enseñanza Básica
creada para la Armada de los Estados Unidos
por la firma de New York de asesores
de Educación Técnica e Ingenieros
VAN VALKENBURGH, NOOGER & NEVILLE, INC.

electricidad básica

parte 3

Ex Libris
Biblioteca
Díaz Arellano

Edición adaptada para España e Hispanoamérica, revisada y dirigida por el Profesor Juan Furió Muñoz, Catedrático de Electrotecnia de la Escuela de Ingenieros Técnicos de Tarrasa

marcombo
BOIXAREU EDITORES
BARCELONA-MEXICO

THE BROLET PRESS
New York

5. *Terminará el estudio de cada Manual jugando una especie de partida de golf contra sí mismo en la que la puntuación máxima es 50, lo que le calificará como imbatible, pues significa que ha contestado acertadamente todas las respuestas en la primera vez, sin fallo alguno. Por cada raspadura que exceda de 50, deja de ganar un tanto, y esto le obligará a seguir la pista del error desde la pregunta hasta la lámina de respuesta y volver a la clave de decodificación. Pero, en definitiva, ese tanto menos significa para Vd. una ganancia, un beneficio: la rectificación de un error de concepto. No se desanime pues por eso, siga deportivamente el juego.*

En resumen, el uso del artificio TRAINER-TESTER *es de gran incentivo y ha tenido mucho éxito en los dos continentes. Sorprenderá al lector el modo de comprobar sus respuestas y lo extremadamente difícil que es «terminar el curso» con un total de sólo 50 raspaduras.*

AUTOEXAMEN

Tal como se advierte en las primeras páginas de este Manual, para cada una de las partes de Electricidad Básica se ha preparado un cuestionario basado en el sistema autodidacta TRAINER-TESTER (entrenador-comprobador) patentado por Van Valkenburgh, Nooger & Neville Inc.

Una vez terminado el estudio de cada una de las partes, el lector debe contestar ordenadamente las 50 preguntas de dicho cuestionario para cerciorarse de que realmente ha asimilado lo que ha estudiado en el texto o aclarar los conceptos que no haya comprendido perfectamente, siguiendo las instrucciones de dicho TRAINER-TESTER, que le remitirán a los párrafos del texto y a las ilustraciones que en cada caso deberá consultar.

Los cinco cuestionarios correspondientes a cada una de las 5 partes, se han reunido en un volumen que complementa a esta serie.

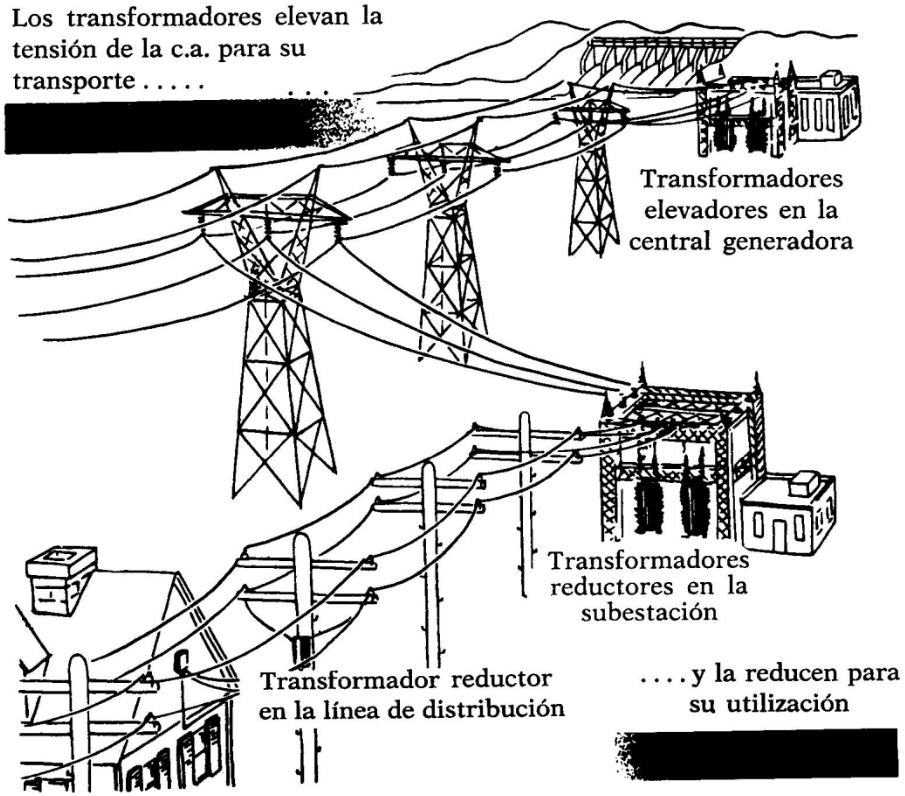
§ 1: QUE ES LA CORRIENTE ALTERNA

Transporte de energía por corriente alterna

Como Vd. sabrá seguramente, la mayoría de «redes» de energía eléctrica suministran corriente alterna (c.a.). Para el alumbrado y las aplicaciones industriales se utiliza muy poco la corriente continua (c.c.).

Hay varias razones que justifican la elección de la c.a. en vez de la c.c. en el transporte de energía eléctrica. Una de estas razones es que la tensión de la corriente alterna se puede aumentar o disminuir fácilmente, y con reducidas pérdidas de potencia, mediante el uso de un transformador; mientras que las tensiones de corriente continua no se pueden variar sin una considerable pérdida de energía. Este es un factor muy importante que influye económicamente en el transporte o transmisión de la energía eléctrica. Generalmente las líneas de transporte, transportan grandes cantidades de energía eléctrica y esto se realiza mejor empleando tensiones muy elevadas. En la central o planta generadora de energía, el valor de la tensión obtenida en los generadores es «elevado» mediante transformadores hasta valores muy altos y enviada la energía por la línea de transporte; luego, en el otro extremo de la línea, otros transformadores «rebajan» la tensión hasta los valores que se utilizan normalmente para el alumbrado y las aplicaciones industriales o de potencia.

Las diferentes clases de equipos o dispositivos eléctricos empleados, requieren diferentes tensiones para su correcto funcionamiento; estas tensiones se pueden obtener fácilmente utilizando un transformador conectado a la red de c.a. Para obtener diversas tensiones partiendo de una «red» de c.c. es necesario utilizar dispositivos complicados y de poco rendimiento.



Transporte de energía por corriente alterna *(continuación)*

La potencia transmitida por una línea de suministro de energía eléctrica, es igual al producto de la tensión existente en el extremo final de línea por la intensidad de la corriente que por ella pasa ($P = EI$). Si se trata de transmitir o suministrar una elevada potencia, los valores de E e I también deberán ser elevados. Ahora bien, el valor de la sección del hilo conductor empleado en la línea limitará el valor máximo de la intensidad (I), mientras que las clases de aislantes empleados limitarán la tensión máxima (E) que puede aplicarse a la línea. Entre el empleo de un conductor de gran sección o el empleo de aislantes de gran calidad, resulta más conveniente y económico esto último, lo que permite un valor elevado de tensión, que el utilizar conductores de gran sección, lo que supondría admitir grandes intensidades.

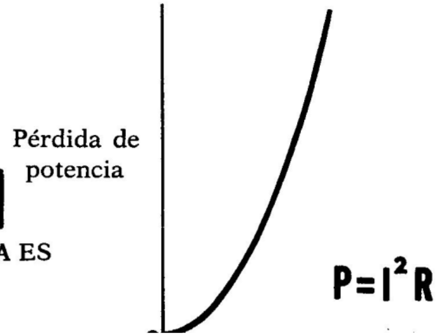
EN LA TRANSMISION DE POTENCIA LA INTENSIDAD ESTA LIMITADA POR LA

Al suministrar energía a un equipo eléctrico, el hilo de la línea de suministro por el que pasa la corriente, consume una potencia, o dicho de otra forma existen unas pérdidas en la línea, cuya potencia es proporcional al cuadrado de la intensidad: $P = I^2R$ (P = pérdida de potencia; I = intensidad en la línea; R = resistencia del hilo de la línea). Cualquier reducción de la intensidad de la corriente necesaria para el transporte de una potencia dada, da lugar a la reducción de la pérdida de potencia en la línea de transporte. Utilizando una tensión alta, se requiere una corriente de poca intensidad para transmitir una cantidad dada de potencia.

El obtener un buen rendimiento en el transporte de energía eléctrica, requiere el uso de tensiones muy altas, lo que supone tener que «elevar» la tensión para el transporte de la energía eléctrica y «reducir» la tensión para su uso una vez transportada. Esto se consigue económicamente si el «suministro» es de c.a., porque permite el uso de transformadores. Más adelante estudiará Vd. cómo elevan y rebajan las tensiones los transformadores.

PERDIDA DE POTENCIA

EN EL TRANSPORTE DE ENERGIA ES PROPORCIONAL AL CUADRADO DE LA INTENSIDAD

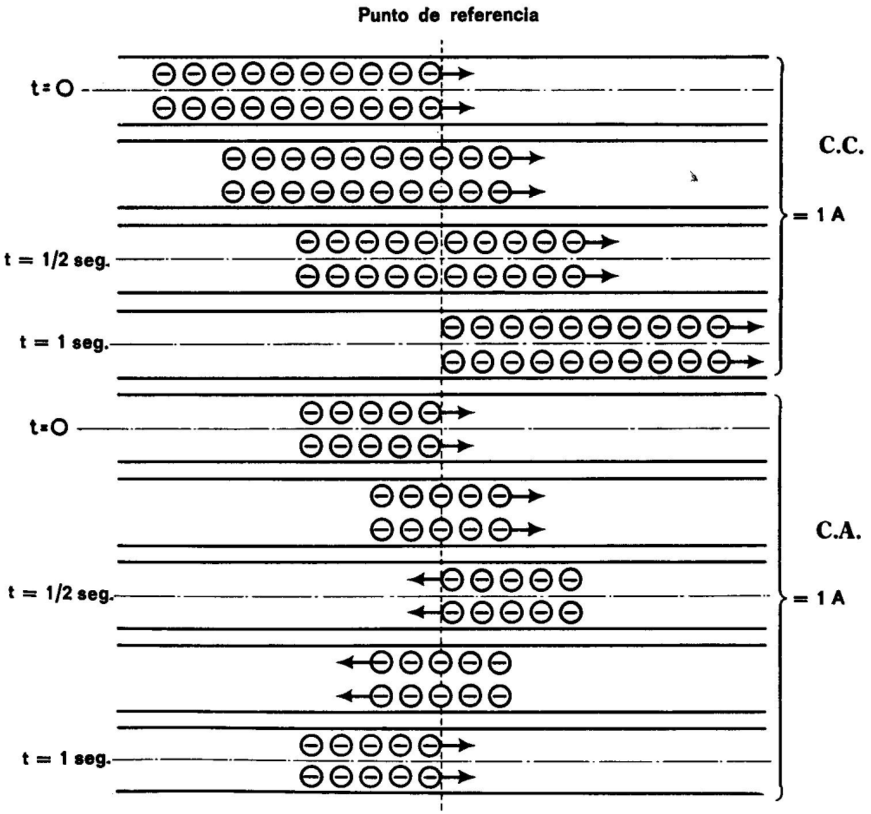


Intensidad de la c.c. y de la c.a.

La corriente alterna (c.a.) avanza y retrocede en un hilo conductor a intervalos regulares, circulando primero en un sentido y luego en el otro. Vd. sabe que la corriente continua sólo circula en un sentido, y que su intensidad se mide por el caudal de la corriente de electrones que pasa por un punto dado del circuito en un segundo.

Supongamos que un culombio de electrones pase por un punto del hilo en un segundo moviéndose todos los electrones en el mismo sentido; entonces el caudal de electrones o intensidad de la corriente es un amperio en c.c. Supongamos ahora que en medio segundo pasa medio culombio de electrones por un punto del hilo moviéndose en un sentido, luego se invierte éste y pasan los electrones por el mismo punto en sentido opuesto durante el medio segundo siguiente. Por el punto habrá pasado, sea en uno u otro sentido, un total de un culombio de electrones en un segundo, y el caudal de electrones o intensidad de la corriente será un amperio en c.a.

COMPARACION de la intensidad de C.C. y de C.A. EN UN HILO

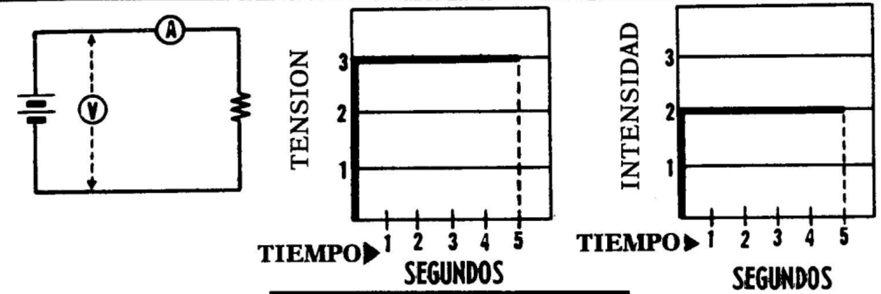


Formas de onda

Las formas de onda son representaciones gráficas que muestran cómo varían las tensiones y las intensidades en un intervalo de tiempo.

Las formas de onda correspondientes a la corriente continua son líneas rectas, porque ni la tensión ni la intensidad varían en un circuito dado. Si Vd. conecta un resistor entre los terminales de una batería y mide, a intervalos de tiempo regulares, los valores de la tensión entre los terminales del resistor y de la intensidad de la corriente que pasa por él, verá que no varían estos valores y si los representa en un gráfico en el que también figuren los intervalos de tiempo, obtendrá líneas rectas, siendo éstas las formas de ondas de tensión y de intensidad del circuito.

LAS FORMAS DE ONDA SON REPRESENTACIONES GRAFICAS DE LAS VARIACIONES DE LA TENSION O LA INTENSIDAD

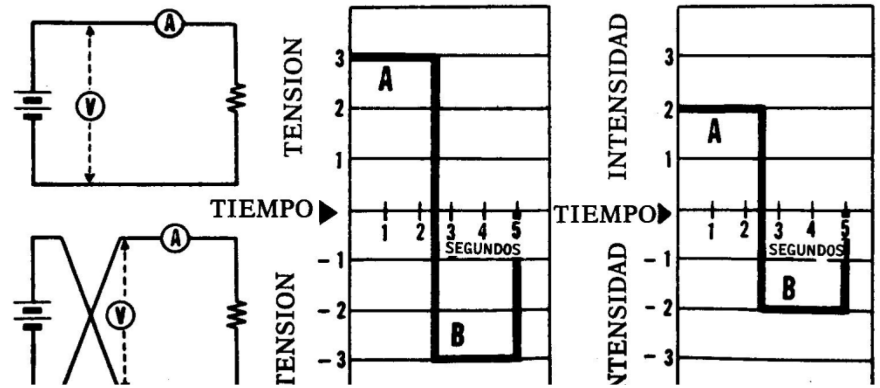


FORMAS DE ONDA DE C.C.

Si, en el mismo circuito, Vd. invierte las conexiones de la batería a intervalos regulares, también se invertirán la tensión entre los extremos del resistor y la corriente que pasa por éste a intervalos idénticos —esto lo puede Vd. comprobar utilizando instrumentos de medición con «cero en el centro de la escala».

Si ahora Vd. representa gráficamente en el mismo papel los valores de las lecturas obtenidas, *E* e *I*, uniendo los puntos correspondientes, observará que se obtienen trozos de recta situados alternativamente por encima y por debajo del eje cero y obtendrá las formas de onda que representan la intensidad y la tensión en este caso; estas formas de onda indican claramente el cambio de sentido de la corriente y la inversión de polaridad de la tensión.

FORMAS DE ONDA DE C. A.



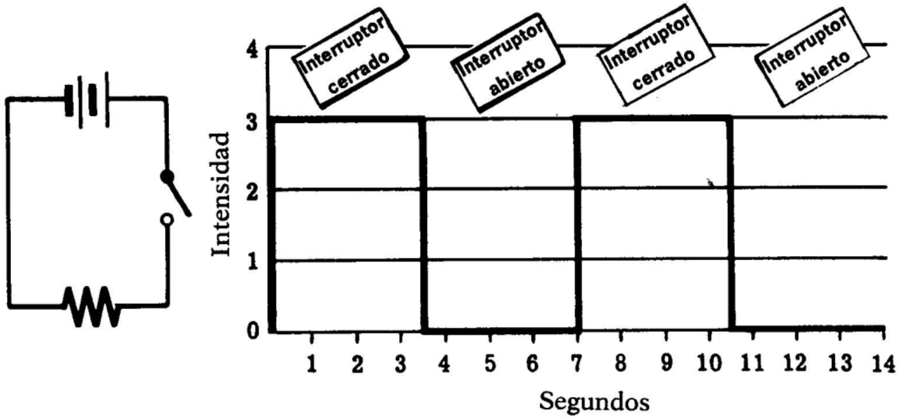
Formas de onda *(continuación)*

Otro tipo de forma de onda es el de la corriente continua pulsante o pulsatoria, que representa variaciones de tensión y de intensidad sin que cambie el sentido de la corriente. Esta clase de forma de onda se encuentra en la salida del generador de c.c. que presenta un rizado u ondulación a causa de la variación producida por la acción del colector.

Las formas de onda que se obtienen con batería no varían, a no ser que se produzca alguna variación en el propio circuito, por ejemplo, invirtiendo los terminales de la batería para obtener una forma de onda de c.a.

Si en un circuito formado por un resistor y un interruptor conectados en serie entre los terminales de la batería, abre y cierra el interruptor haciendo que cese y se establezca la corriente sin que se invierta su sentido, la corriente del circuito será corriente continua pulsatoria. Las formas de onda de la intensidad de esta corriente pulsatoria son semejantes a las formas de onda de c.a. que en la página anterior ha visto Vd., pero no descienden debajo de cero ya que la corriente no cambia de sentido.

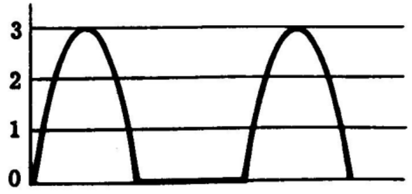
C.C. PULSATORIA

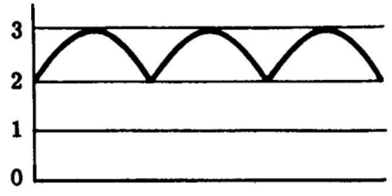


Las formas de onda de tensión y de intensidad son generalmente, en la práctica, curvas que representan cambios graduales sin transiciones bruscas.

La intensidad de la corriente continua pulsatoria no varía siempre entre cero y un valor máximo, sino que puede variar en cualquier margen comprendido entre estos valores. La forma de onda de un generador de c.c. es la de una c.c. pulsatoria que no disminuye hasta cero, pero que varía solo ligeramente por debajo del máximo valor.

OTRAS FORMAS DE ONDAS DE C.C. PULSATORIA...

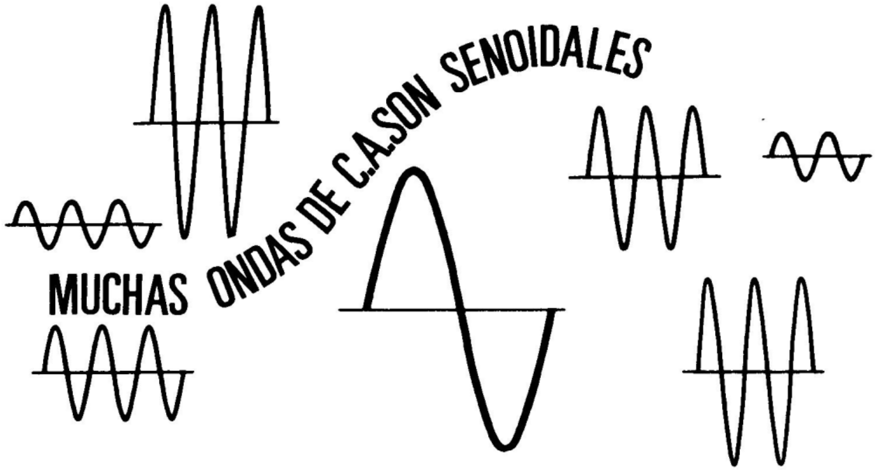




Formas de onda *(continuación)*

Las formas de onda de la mayoría de corrientes alternas aumentan gradualmente desde cero hasta un máximo y luego disminuirá hasta cero en cada sentido.

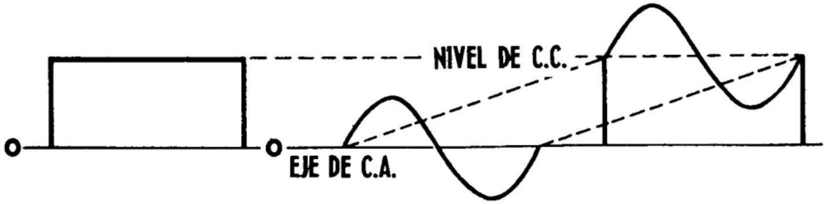
La mayoría de las corrientes alternas que Vd. utilizará tienen la forma representada por una curva senoidal de la cual estudiará en las páginas siguientes lo que necesita saber. Aunque las corrientes y las tensiones alternas no siempre tienen formas de onda que son exactamente senoidales, *normalmente* se supone que *su forma es senoidal,* a no ser que se advierta lo contrario.



Cuando en el mismo circuito están presentes simultáneamente tensiones de corriente continua y de corriente alterna, la forma de onda de la tensión resultante es una combinación de las dos tensiones. La onda de c.a. se añade o suma a la onda de c.c., y la recta que representa la tensión de c.c. se convierte en el eje desde el cual se aparta la onda de c.a. en ambos sentidos. Así la tensión de c.c. reemplaza al valor cero como eje de la forma de onda de c.a.

La forma de onda resultante no es la de una c.c. pura ni la de una c.a. pura. Se la denomina «c.a. superpuesta» para expresar que es la onda de c.a. superpuesta o colocada sobre la onda de c.c.

Cuando se suman c.a. y c.c., el eje de la c.a. se desplaza, originando una «c.a. superpuesta»



Onda de c.c. + onda de c.a. = **Onda de c.a. superpuesta**

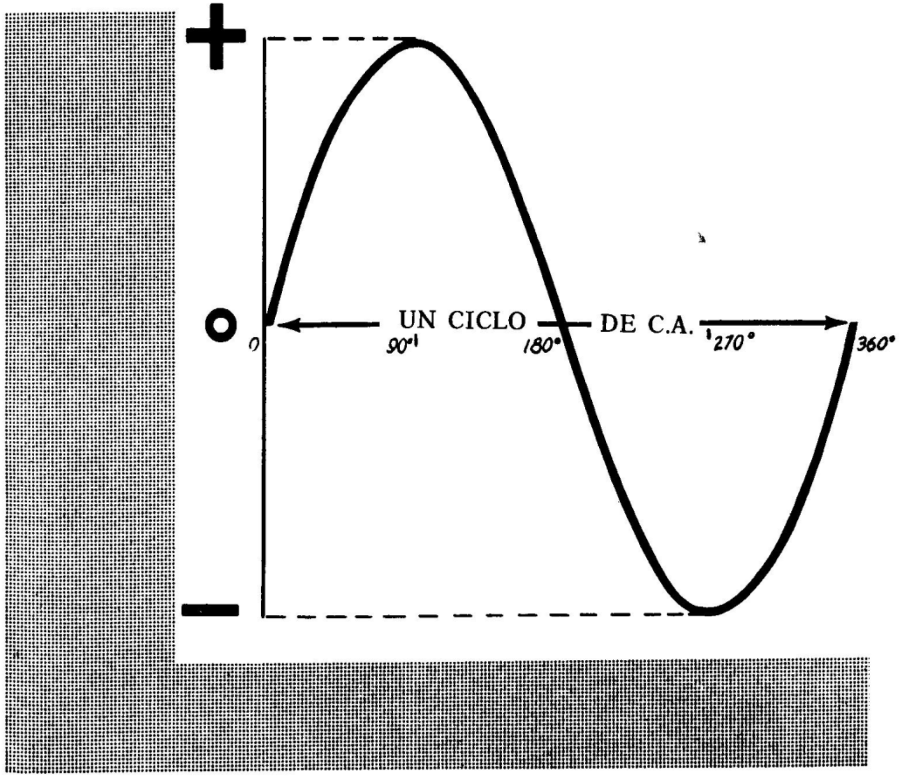
Ciclos de corriente alterna

Cuando la forma de onda de una tensión o de una corriente de c.a. pasa por todo un conjunto de valores positivos y negativos, completa un «ciclo».

La intensidad de la corriente de c.a. aumenta primero hasta un máximo y luego disminuye hasta cero en un sentido, después aumenta hasta un máximo y disminuye hasta cero en sentido contrario. Esto completa un ciclo de la intensidad de c.a. y el ciclo se repite mientras dure la corriente.

Así, una tensión de c.a. aumenta primero hasta un máximo y disminuye hasta cero en una polaridad, luego aumenta hasta el máximo y disminuye hasta cero en la polaridad opuesta para completar un ciclo. Cada juego o conjunto completo de valores positivos y negativos de la tensión o la intensidad forman un ciclo.

UN CICLO ES UN JUEGO COMPLETO DE VALORES POSITIVOS Y NEGATIVOS



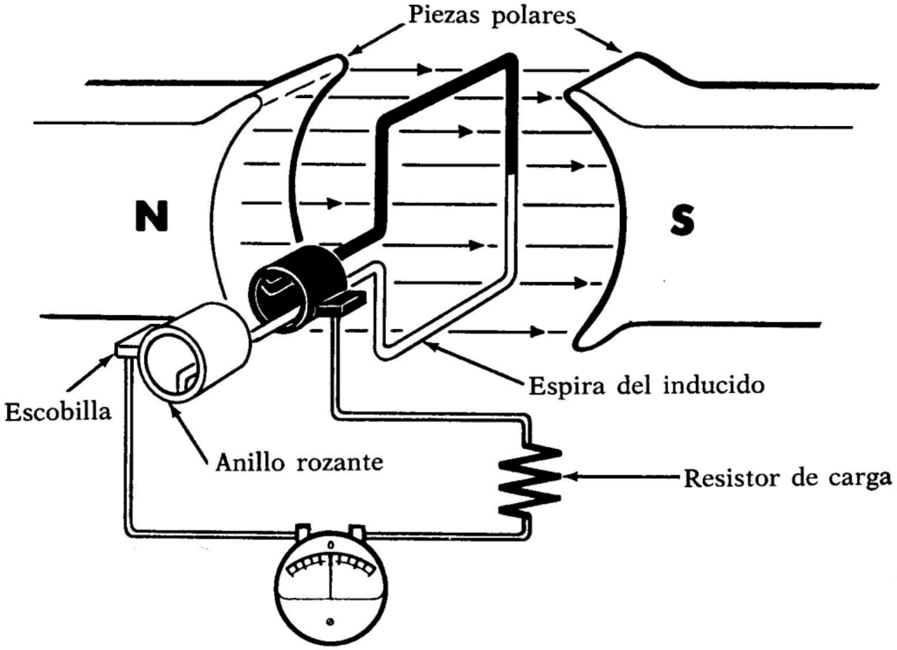
En la página siguiente estudiará Vd. cómo es un generador elemental de c.a., constituido por una espira o bucle de hilo conductor girando en un campo magnético entre dos polos magnéticos opuestos. Cada vez que una cara de la espira pasa de un polo al otro, se invierte el sentido de la corriente generada en la espira. Primero la corriente circula en un sentido y luego en el otro, completando un ciclo.

Construcción de un generador elemental

En la parte 1 ha estudiado que cuando un hilo conductor se mueve en un campo magnético, se produce electricidad. Un generador elemental consiste en una espira de hilo conductor colocada de modo que pueda girar dentro de un campo magnético uniforme para que se produzca electricidad en ella. Si se utilizan contactos deslizantes apropiados que permitan conectar la espira a un circuito exterior, circulará una corriente por el circuito exterior y por la espira.

Las piezas polares son los polos Norte y Sur del imán que provee el campo magnético. La espira que gira en el interior del campo se llama «inducido». Los extremos de la espira del inducido están conectados a aros llamados «anillos rozantes» que giran con el inducido. Los colectores de corriente, que se llaman «escobillas», frotan contra los anillos rozantes para recoger la electricidad generada en el inducido y enviarla o encauzarla al circuito exterior.

EL GENERADOR ELEMENTAL



En la descripción del funcionamiento del generador, que se expone en las páginas siguientes, imagínese la espira giratoria situada en el campo magnético. La espira está representada en las figuras con forma rectangular, y cuando sus lados horizontales cortan transversalmente al campo magnético, se genera en ellos una f.e.m. que origina una corriente que circulará por el circuito formado por la espira, los anillos rozantes, las escobillas, el amperímetro con cero central y el resistor de carga, todo ello conectado en serie.

La f.e.m. generada en la espira, y por consiguiente la intensidad de la corriente que pasa por ella, depende de la posición de la espira con relación al campo magnético.

Funcionamiento del generador elemental

He aquí cómo funciona el generador elemental. Suponga que el inducido, o sea, la espira, esté girando en el sentido de las manecillas del reloj, y que su posición inicial es A (cero grados). En la posición A, el plano de la espira es perpendicular al campo magnético y los conductores activos o lados horizontales de la espira se están moviendo paralelamente a las líneas del campo magnético. Si un conductor se mueve paralelamente a las líneas de fuerza de un campo magnético, es decir, no corta las líneas de fuerza, no se genera f.e.m. en el conductor. Esto se aplica a los lados o conductores activos de la espira en el instante en que pasan por la posición A —no se genera f.e.m. en ellos y, por consiguiente, tampoco pasa corriente por el circuito—. El amperímetro da lectura cero.

Considerando el tiempo que la espira emplea en pasar de la posición A a la B dividido en pequeñas porciones, todas ellas iguales, observaríamos que al desplazarse la espira de la posición A a la B, a cada porción sucesiva de tiempo, sus conductores horizontales cortan cada vez mayor número de líneas de fuerza, hasta que en la posición B el número de líneas cortadas es máximo.

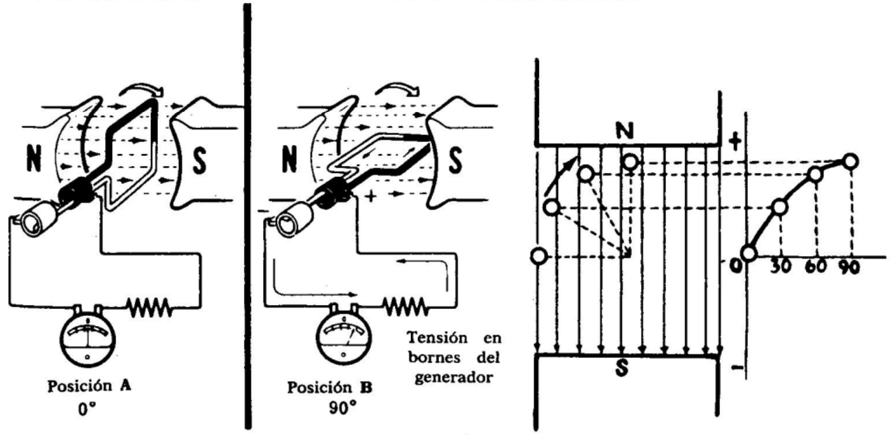
Esto supone que, entre cero (posición A) y 90 grados (posición B), la f.e.m. inducida en los conductores aumenta desde 0 hasta un máximo.

Observe en la figura que, desde 0 hasta 90 grados, el conductor negro corta hacia abajo las líneas de fuerza, mientras que al mismo tiempo el conductor blanco corta hacia arriba a las líneas de fuerza. Observe también que, debido a ello, los efectos de las fuerzas electromotrices, inducidas en dichos conductores, se suman y que por lo tanto la tensión resultante entre las escobillas (tensión entre los terminales) es la suma de las dos fuerzas electromotrices. Por consiguiente será doble que la de uno de los conductores, ya que las dos fuerzas electromotrices son iguales.

La intensidad de la corriente que pasa por el circuito variará lo mismo que varía la f.e.m., siendo cero en 0 grados y aumentando hasta el máximo en 90 grados. La aguja del amperímetro se desviará cada vez más hacia la derecha entre las posiciones A y B, indicando que la corriente circula en el sentido indicado en la figura. El sentido de la corriente y la polaridad de la f.e.m. dependen del sentido de las líneas del campo magnético y del sentido de giro de la espira del inducido.

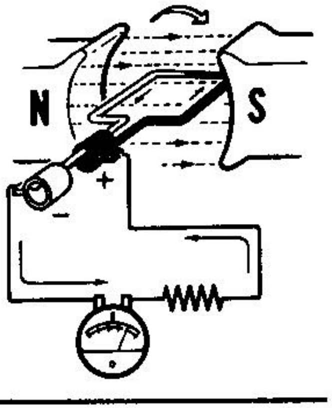
La forma de onda muestra cómo varía la tensión entre los terminales o bornes del generador elemental desde la posición A hasta la posición B. La figura de la derecha muestra la relación entre diferentes posiciones adoptadas por la espira al pasar de A a B y la forma de onda generada.

COMO FUNCIONA EL GENERADOR ELEMENTAL

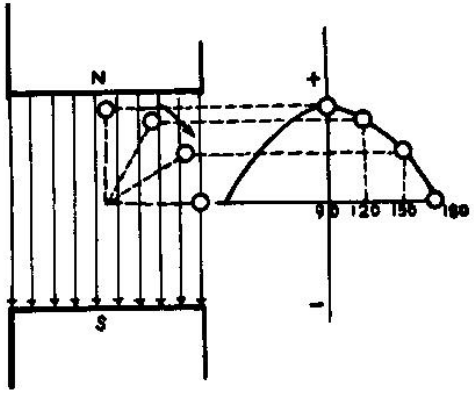


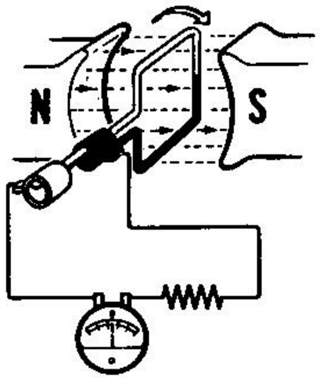
Funcionamiento del generador elemental *(continuación)*

Cuando la espira continúa girando desde la posición B (90 grados) hasta la posición C (180 grados) los conductores que cortan el máximo número de líneas de fuerza en la posición B cortan cada vez menos líneas de fuerza, hasta que en la posición C se mueven paralelamente las líneas del campo magnético y ya no cortan ninguna. Por consiguiente, la f.e.m. generada disminuirá mientras el bucle se mueva desde 90 hasta 180 grados, de la misma manera que aumentó desde 0 hasta 90 grados. La intensidad de la corriente seguirá análogamente las variaciones de tensión. La acción del generador en las posiciones B y C está representada en la figura.



Posición B
90°





Posición C
180°

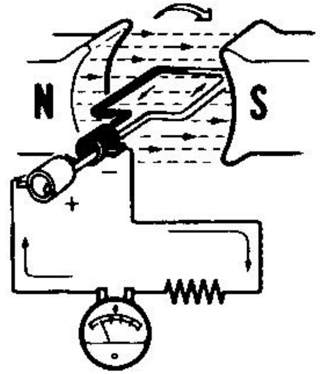
Funcionamiento del generador elemental *(continuación)*

Desde cero hasta 180 grados, los conductores de la espira se están moviendo en el mismo sentido a través del campo magnético; por consiguiente la polaridad de la f.e.m. no cambia. Pero cuando el bucle sigue girando desde la posición de 180 grados hasta la posición A, el sentido en que cortan los conductores a las líneas del campo magnético se invierte. Ahora el conductor negro corta hacia arriba las líneas del campo y el conductor blanco las corta hacia abajo.

En consecuencia, se invertirá la polaridad de la f.e.m. generada y el sentido de la corriente. Mientras la espira está girando desde la posición C hasta la posición D y vuelve hacia la posición A, la corriente circulará en sentido contrario al que tenía cuando el bucle giraba desde A hasta C. La tensión entre los terminales del generador será la misma que durante el giro del bucle desde A hasta C, excepto que su polaridad es contraria.

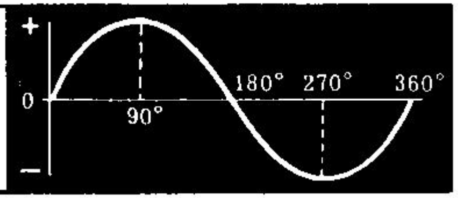
La forma de onda de la tensión de salida en la revolución completa del bucle está representada abajo.

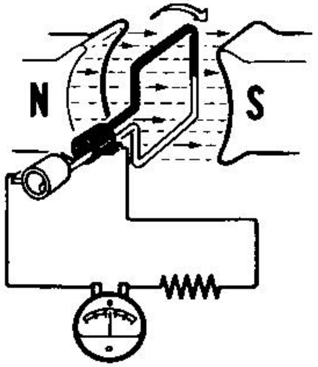
Se dice que la f.e.m. generada es «inducida» en el bucle por el movimiento relativo de los conductores y del campo magnético.



Posición D
270°

Tensión en bornes del generador



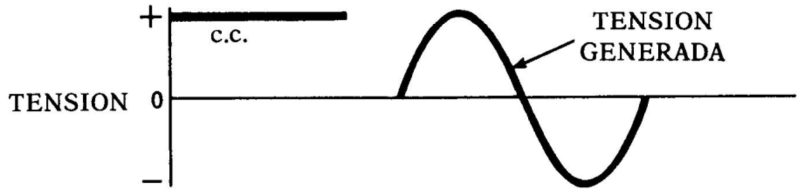


Posición A
360°

Salida del generador elemental

Estudie un poco más detenidamente la forma de onda de salida del generador elemental y compare estas tensiones con las que ha estudiado Vd. hasta ahora.

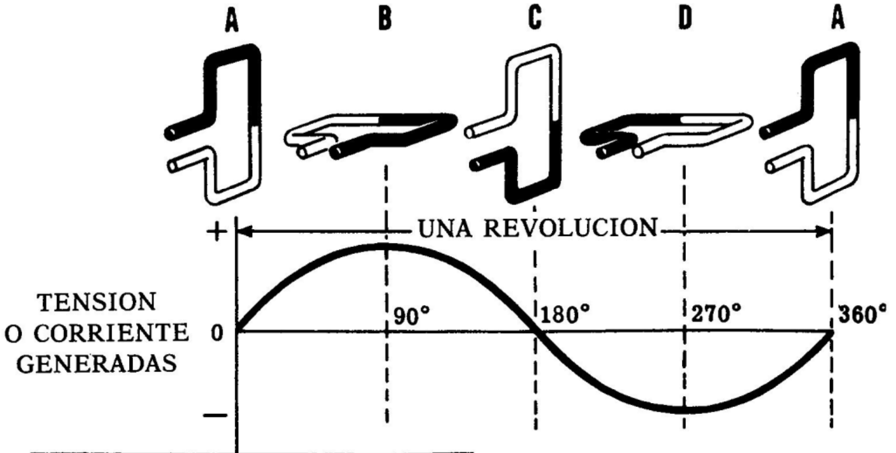
Una tensión de c.c. tal como la obtenida de una batería, se puede representar por una línea recta cuya distancia al eje o línea de referencia cero depende su valor. En la siguiente figura está en primer lugar representada una tensión de c.c. y a continuación la forma de onda de tensión de un generador elemental de c.a. Verá que la forma de onda generada en éste no tiene un valor ni un sentido constante; en efecto, la curva varía continuamente de valor, siendo positivos los valores de la primera mitad y negativos los de la segunda.



Por consiguiente, la tensión generada no es de c.c., ya que no siempre tiene la misma polaridad. La tensión generada se llama «tensión alterna», porque sus valores alternan periódicamente de positivos a negativos. Generalmente se la denomina tensión c.a., siendo su forma de onda del mismo tipo que la correspondiente a la de la tensión existente en los bornes de una base de enchufe de los que Vd. utiliza normalmente.

Como la corriente que produce esta tensión varía con ella, debe ser también alterna. Se la designa generalmente de modo abreviado por c.a.

La corriente alterna siempre va asociada a una tensión alterna —una tensión alterna siempre produce una corriente alterna.



forma de onda de C.A.

Frecuencia de la corriente alterna

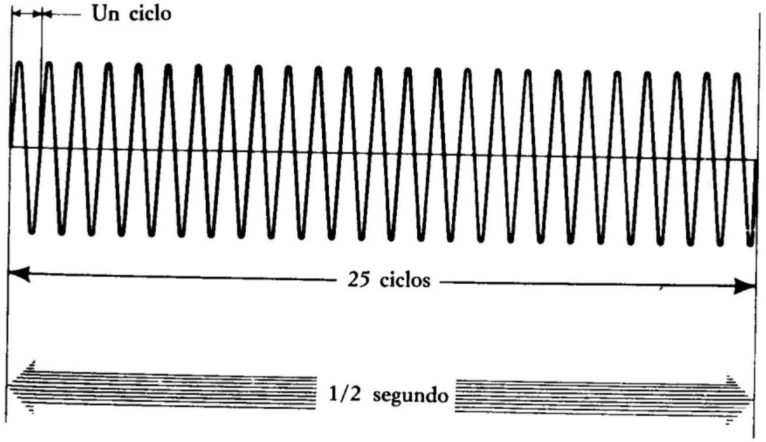
Ha visto Vd. que cuando la espira del generador elemental gira un ángulo de 360° —una revolución completa— la f.e.m. generada completa un ciclo.

Si la espira gira a velocidad de 50 revoluciones por segundo, la f.e.m. generada completará 50 ciclos cada segundo, y entonces se dice que tiene una «frecuencia» de 50 ciclos por segundo (50 c/s). El ciclo por segundo es denominado también hertz (abreviadamente Hz), según norma internacional y en honor al físico alemán del mismo nombre. En castellano se utiliza el vocablo hertzio o hercio. La frecuencia de la f.e.m. generada es siempre el número de ciclos completos por segundo.

Es importante comprender bien lo que es la frecuencia de la corriente alterna, ya que la mayoría de dispositivos o equipos eléctricos de c.a. requieren una determinada frecuencia, así como una tensión y una corriente específicas, para su funcionamiento correcto.

La frecuencia comercial normalizada o estándar en Europa es de 50 ciclos por segundo. Las frecuencias más bajas que 50 c/s producen parpadeo o fluctuación cuando se emplea la corriente eléctrica para alumbrado. La razón es que, cada vez que cambia el sentido de la corriente, su intensidad pasa por el valor cero, y por consiguiente el efecto es el mismo que si se desconectase momentáneamente una lámpara eléctrica. A 50 c/s la lámpara se conecta y desconecta 100 veces por segundo. El ojo humano no puede reaccionar suficientemente deprisa para detectar esto y percibe la sensación de que la lámpara está permanentemente encendida.

FRECUENCIA ES EL NUMERO DE CICLOS POR SEGUNDO

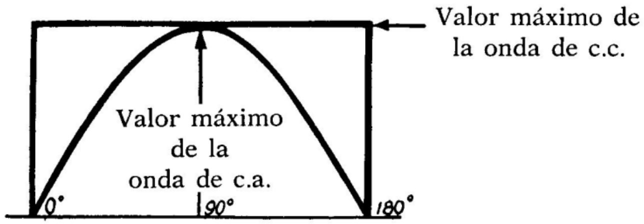


Si se completan 25 ciclos en 1/2 segundo, la frecuencia es de 50 ciclos por segundo

Valores máximo y cresta a cresta de una onda senoidal

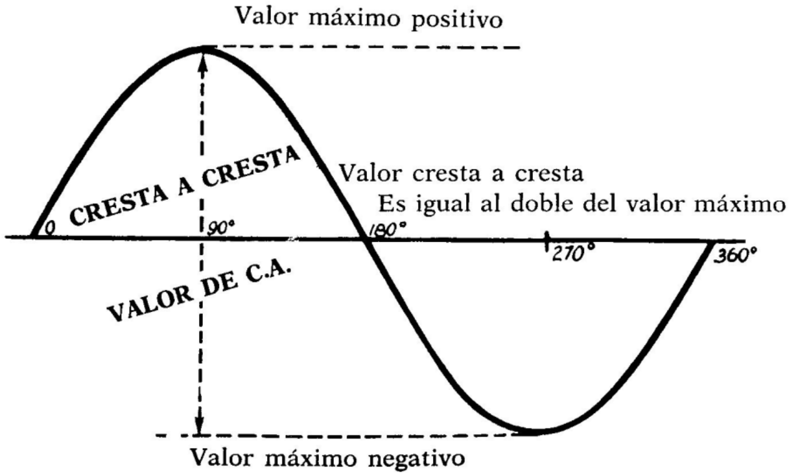
Suponga que compara un semiciclo de una onda senoidal de c.a. con una onda de c.c. durante el mismo intervalo de tiempo. Si la c.c. se inicia y cesa en el mismo instante que el semiciclo de la onda senoidal, y si tanto el valor máximo de una como de la otra onda son iguales, observará que los valores de c.c. son mayores que los valores correspondientes de c.a. en todos los puntos excepto en aquel en que la onda senoidal de c.a. pasa por su valor máximo. En este punto los valores de c.c. y c.a son iguales. Este punto de la onda senoidal es el que corresponde al máximo valor o valor de cresta.

COMPARACION de las ONDAS de C.C. y C.A.



En cada ciclo completo de c.a. hay dos valores máximos o de crestas, uno correspondiente al semiciclo positivo y el otro al semiciclo negativo. La diferencia entre el valor positivo de cresta y el valor negativo de cresta se llama *valor cresta a cresta* de una onda senoidal. Este valor es igual al doble del valor máximo o de cresta de la onda senoidal, valor que algunas veces se utiliza para medir las tensiones de c.a.

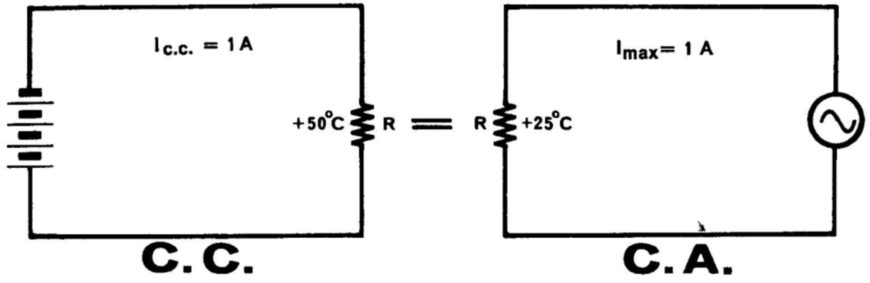
Sin embargo, ordinariamente las tensiones y las corrientes de c.a. se expresan en valores eficaces (término que Vd. estudiará más adelante), en vez de valores cresta a cresta.



Valor eficaz de una onda senoidal

Ya ha estudiado que cuando pasa por una resistencia una corriente de cualquier tipo —c.c. o c.a.— se pierde potencia, debido a que la energía eléctrica se convierte en calor. La velocidad a que es convertida la energía eléctrica en calor (o en otra forma de energía) será evidentemente menor en el caso de la c.a. (que varía continuamente entre los valores máximos y cero) que en el caso de una c.c. constante y de igual valor al máximo valor de c.a.

Es necesario emplear algún medio para relacionar la c.c. y la c.a. para poder determinar su eficiencia relativa en la conversión de energía. Una manera cómoda de hacerlo es comparar el efecto calorífico o térmico que se produce en un resistor de un determinado valor cuando pasa por él una c.c. durante un intervalo dado de tiempo, y cuando pasa por él durante el mismo intervalo de tiempo una c.a. cuyo valor máximo sea igual al valor de la c.c. El aumento de temperatura producido por la c.a. en el resistor se compara luego con el aumento de temperatura producido por la c.c., y por su relación o cociente se calcula el valor eficaz de la c.a.



Considere los dos circuitos de arriba, los cuales tienen ambos un resistor R de idéntico valor. En el circuito de c.c. de la izquierda, una corriente de un amperio aumenta la temperatura del resistor en, por ejemplo, 50 °C. En el circuito de c.a. de la derecha, en el que el valor máximo de la corriente (I_{max}) es también un amperio, la temperatura del resistor sólo aumenta 25 °C.

Lo que Vd. desea conocer es el valor eficaz de la intensidad de c.a., expresado como fracción de I_{max} (o de I_{cc}). (El valor eficaz de una corriente alterna se le denomina abreviadamente en inglés valor r.m.s. Estas son las iniciales de «raíz cuadrada de la media de cuadrados» —root mean square— y su significado se explica en la página siguiente).

Vd. ya sabe que la pérdida de potencia, o energía consumida, en un resistor se halla mediante la fórmula $P = I^2R$. En el circuito de arriba, la pérdida de potencia ($I^2_{cc} \times R$) originada por un amperio de c.c. elevó la temperatura del resistor 50 °C, mientras que en el circuito de c.a. la pérdida de potencia ($I^2 \times R$) originada por una I_{max} de un amperio es sólo la mitad de la pérdida de c.c., ya que elevó la temperatura en sólo 25 °C.

Se deduce de ello que $I^2 \times R = \frac{1}{2} I^2_{cc} \times R = \frac{1}{2} I^2_{max} \times R$

Simplificando, $I^2 = \frac{1}{2} I^2_{max}$

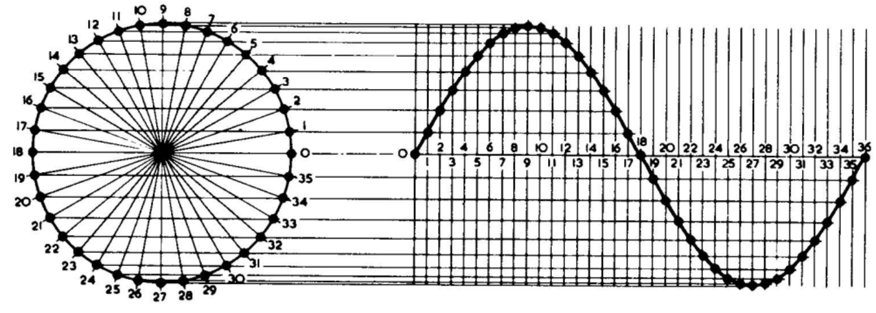
y $I = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{max} = 0{,}707\ I_{max}$

En otras palabras, I, valor eficaz de la corriente alterna, es sólo 0,707 de la I_{max}; e *I_{max} en el circuito de c.a. deberá aumentar hasta $I \times \sqrt{2}$ (=1,414 amperios) para obtener el mismo efecto térmico que un amperio de corriente continua.*

Valor eficaz de una onda senoidal *(continuación)*

Para confirmar que el valor eficaz (I) de una corriente alterna cuya forma de onda sea senoidal es 0,707 (I_{max}) dibuje primero una onda senoidal con un valor máximo de 25 mm.

Puede hacer esto dibujando una circunferencia con un radio de 25 mm y dividiéndola en arcos de 10° con un transportador. Numere las líneas de 0 a 35, tal como en la ilustración de abajo.



Dibuje el eje de la onda senoidal a la derecha de la circunferencia y prolónguelo para que pase por el centro de la circunferencia. Marque en este eje 36 divisiones iguales y numérelas de 0 a 36. Pase una recta vertical por cada punto de la división o marca.

Ahora trace rectas paralelas al eje y que pasen cada uno de los puntos numerados en la circunferencia hasta que corten a la recta vertical del mismo número. La línea desde el punto 1 de la circunferencia cortará a la vertical trazada por la división 1 del eje y así sucesivamente.

Dibujando la curva que une los puntos de intersección de las horizontales con las verticales correspondientes, como muestra el diagrama, obtendrá una onda senoidal.

Suponga que la onda senoidal que ha trazado representa una corriente alterna con un valor máximo de un amperio (representado por los 25 mm). Podrá hallar el valor eficaz de la intensidad de la manera siguiente:

(a) midiendo el valor de la intensidad —la altura de la onda senoidal por encima del eje— en cada una de las divisiones del eje.

(b) elevando al cuadrado estos valores instantáneos y hallando el valor de la media aritmética de los valores elevados al cuadrado —recuerde que el efecto calorífico de una corriente es proporcional al valor medio del cuadrado de la corriente.

(c) hallando la raíz cuadrada de la media aritmética de los valores elevados al cuadrado —este es el valor de «raíz cuadrada de la media de cuadrados» o valor eficaz de la intensidad.

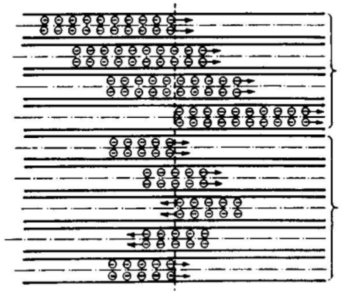
Hallará que el valor eficaz de una c.a. con un valor máximo de un amperio es 0,707 amperio.

Como las corrientes alternas están originadas por fuerzas electromotrices alternas, la relación entre los valores eficaz y máximo de las fuerzas electromotrices es la misma que para las intensidades. El valor eficaz (E) de una f.e.m. de onda senoidal es 0,707 multiplicado por el valor máximo (E_{max}).

Cuando se especifica una intensidad o una tensión alterna, la especificación se refiere siempre al valor eficaz a no ser que se indique lo contrario. Todos los medidores o instrumentos de medida dan lecturas de valores eficaces de intensidad y de tensión, salvo que en ellos esté indicado lo contrario.

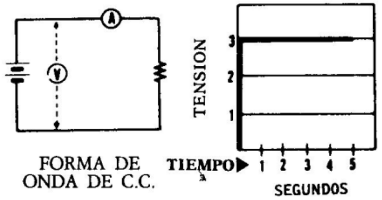
REPASO de la corriente alterna

La corriente alterna difiere de la corriente continua no sólo en la forma de onda y en el movimiento de los electrones, sino también por su comportamiento en los circuitos eléctricos. Antes de estudiar este comportamiento debe Vd. repasar todo lo que ya ha estudiado acerca de la c.a. y de la onda senoidal.



Corriente alterna. **Es la que cambia constantemente de valor y cuyo sentido se invierte a intervalos regulares.**

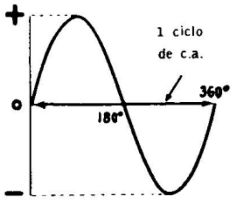
Forma de onda. **Representación gráfica de las variaciones de la tensión o de la intensidad en un intervalo de tiempo.**



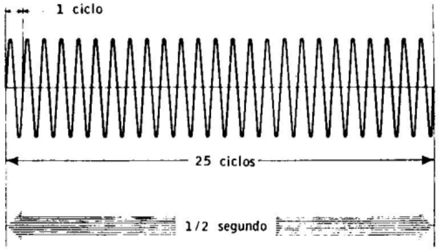
FORMA DE ONDA DE C.C.

Onda senoidal. **Curva continua representando todos los valores instantáneos de una intensidad o de una tensión alternas.**

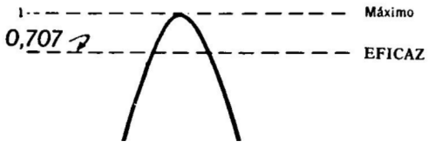
Ciclo. **Conjunto completo de valores positivos y negativos de una onda de intensidad o de tensión alterna.**



Frecuencia. **Número de ciclos por segundo.**



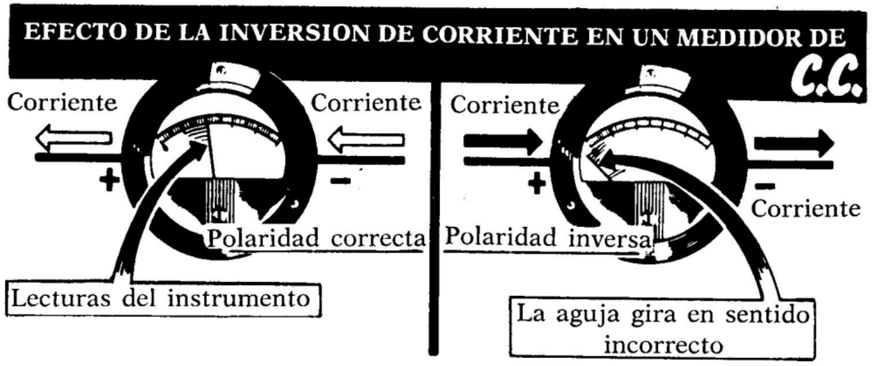
Valores máximo y eficaz **de una onda senoidal.**



§ 2: INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE C.A.

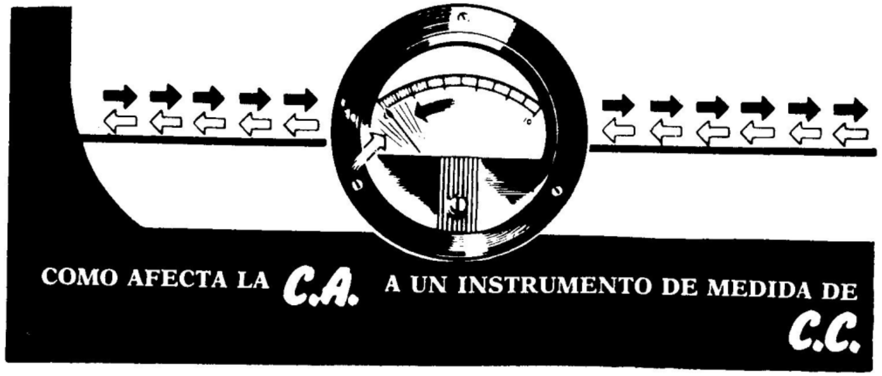
¿Por qué los mecanismos de bobina móvil utilizados en c.c. no sirven para las mediciones de c.a.?

La mayoría de los instrumentos de medida de c.c. utilizan el mecanismo básico de bobina móvil en el que la bobina móvil está suspendida en el campo magnético existente entre los polos de un imán permanente. La corriente que pasa por la bobina en sentido correcto (polaridad) hace girar a la bobina, y mueve a la aguja o índice en la escala. Sin embargo, Vd. recordará que la inversión de polaridad hace que la bobina móvil tienda a girar en sentido contrario, tendiendo a desplazar la aguja por debajo del cero.



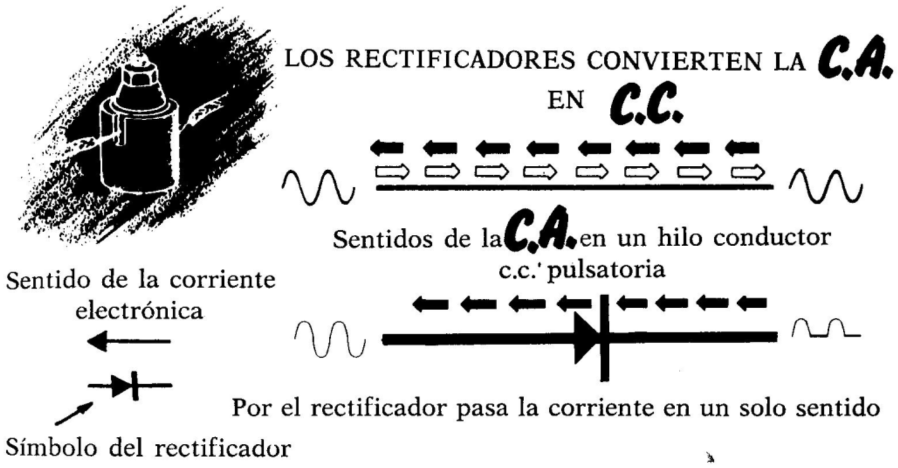
Si pasase una corriente alterna por uno de estos mecanismos básicos de medidor de c.c., la bobina móvil giraría en un sentido durante un semiciclo y luego cuando se invirtiese el sentido de la corriente, la bobina móvil giraría en sentido contrario. Si la frecuencia de la corriente alterna fuese 50 Hz, la aguja no podría seguir las inversiones de la corriente con suficiente rapidez, por lo que vibraría fluctuando alrededor de cero, que es el valor medio de la onda de c.a.

Cuanto mayor sea la intensidad de la corriente, más tendencia tendrá la aguja a fluctuar y, en un corto tiempo, la vibración excesiva puede deteriorar el instrumento. Incluso si la aguja pudiese desplazarse en uno y otro sentido con suficiente rapidez, la velocidad de movimiento sería tan grande que no se podría hacer lectura alguna en el medidor.

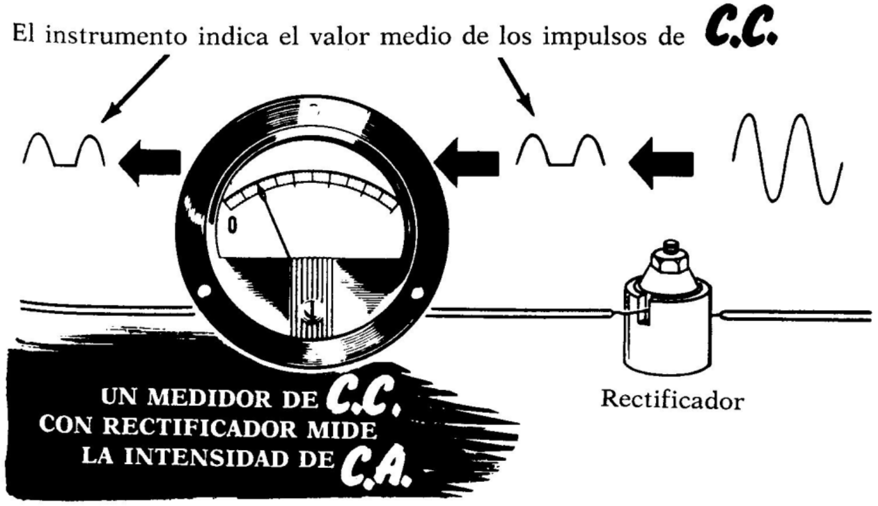


Medidores de c.a. del tipo rectificador

Para mediciones de c.a. se puede utilizar un mecanismo básico de medidor de c.c. asociado a un rectificador, el cual es un dispositivo que convierte la c.a. en c.c. El rectificador permite que la corriente circule en un sentido, pero no en el contrario, por lo que, cuando la c.a. tiende a pasar por él, el rectificador sólo permite que pase la mitad de cada ciclo completo. El efecto de este rectificador sobre la c.a. está representado a continuación.



Si el rectificador está conectado en serie con un mecanismo medidor del tipo de bobina móvil, de modo que sólo permita el paso de la corriente en sentido correspondiente a la correcta polaridad del medidor, por éste pasará la corriente en forma de impulsos. Como estos impulsos de corriente son todos del mismo sentido, hacen que la aguja se desvíe. Esta no puede moverse con suficiente rapidez para volver al cero entre los impulsos, lo que indica continuamente el valor medio de la intensidad de los impulsos de corriente.



Medidores de c.a. del tipo rectificador *(continuación)*

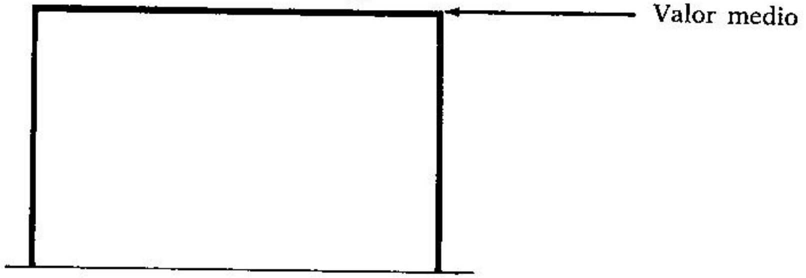
Si Vd. compara un semiciclo de una onda senoidal de c.a. con la forma de onda de c.c. de la página 3.14, verá que los valores instantáneos de c.a. son todo menores que el valor de c.c., excepto el valor de cresta de la onda senoidal. Como todos los puntos de la onda de c.c. son iguales al valor máximo, este valor es también el valor medio de la onda de c.c.

El valor medio de un semiciclo de onda senoidal de c.a. es menor que el valor de cresta, puesto que todos los puntos de la forma de onda son de menor valor, excepto uno.

En todas las ondas senoidales, el de valor medio de un semiciclo es 0,637 del valor máximo o de cresta. Este valor se obtiene promediando todos los valores instantáneos de la onda senoidal correspondientes a un semiciclo. Como la forma de la onda senoidal no cambia, aunque cambie el valor máximo, el valor medio de cualquier onda senoidal es siempre 0,737 multiplicado por el valor de cresta o valor máximo.

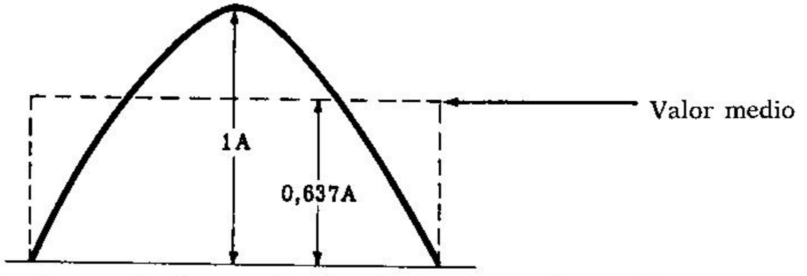
VALORES MEDIOS DE LAS FORMAS DE ONDA

Forma de onda de c.c.



El valor medio de c.c. es igual al valor máximo

Forma de onda de c.a.



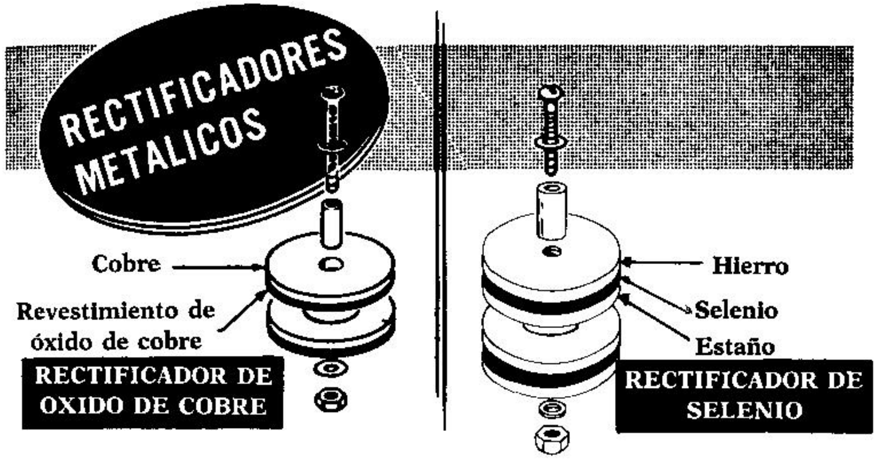
El valor medio dé c.a. es igual a 0,637 multiplicado por el valor máximo

Aunque la desviación de la aguja depende del valor medio en cada semiciclo de corriente, lo usual es que la escala de los medidores esté calibrada para dar directamente las lecturas en valores eficaces.

Medidores de c.a. del tipo rectificador *(continuación)*

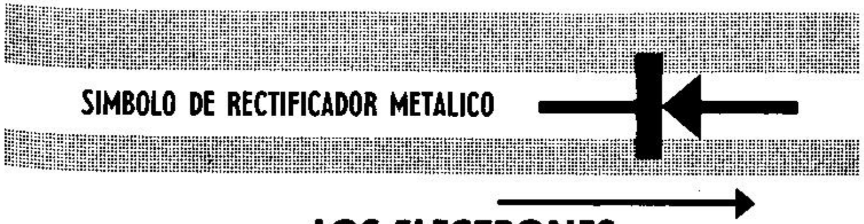
Cuando ciertos materiales metálicos son presionados unos contra otros para formar una unión, la combinación actúa como un rectificador que presenta baja resistencia al paso de la corriente en un sentido y una resistencia muy alta en el sentido contrario. Las combinaciones de la mayoría de metales que se utilizan como rectificadores están constituidas por cobre y óxido de cobre, aleación de cadmio (o de estaño) y selenio.

Los rectificadores metálicos se construyen en forma de discos cuyo diámetro puede variar entre menos de media pulgada (12,7 mm) y más de 6 pulgadas (152 mm). Los rectificadores de óxido de cobre se componen de discos de cobre recubiertos en una cara con una capa de óxido de cobre, y los rectificadores de selenio se construyen con discos de un metal tal como níquel, hierro o aluminio, recubiertos en una cara con selenio, depositándose sobre la cara exterior del último disco un electrodo en forma de capa de aleación de cadmio o estaño.



Los elementos de los rectificadores metálicos (un elemento es un solo disco) se fabrican generalmente en forma de arandelas ensambladas sobre un perno de montaje, en la combinación serie o paralelo que se desee, para formar la unidad rectificadora. El símbolo utilizado para representar un rectificador metálico de cualquier tipo es el que se muestra abajo.

Como estos rectificadores se construyeron ya antes de que se hiciera uso de la teoría electrónica para determinar el sentido de la corriente, las flechas apuntan en el sentido convencional de la corriente, o sea en el opuesto al de la corriente electrónica. Así, la flecha apunta en sentido contrario al de la corriente según la teoría electrónica.



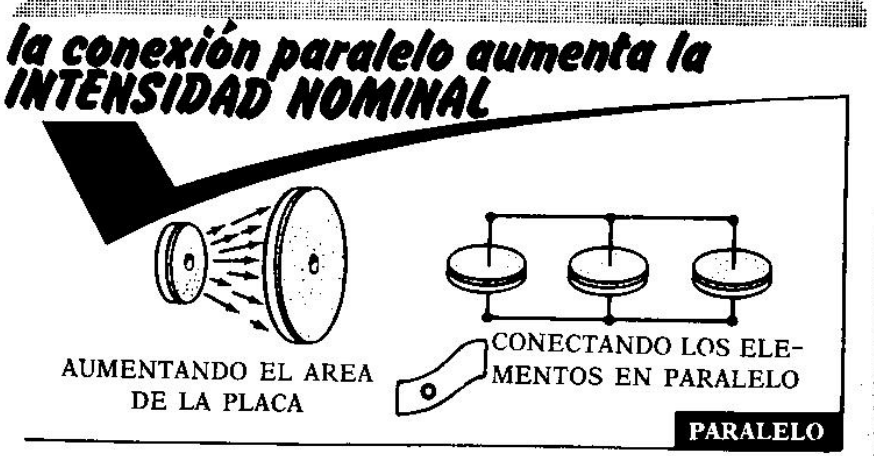
LOS ELECTRONES

fluyen en sentido contrario al de la flecha del símbolo

Medidores de c.a. del tipo rectificador *(continuación)*

La tensión nominal, o tensión que el fabricante admite se aplique sin peligro de deterioro entre los terminales de un solo elemento rectificador metálico, es sólo de algunos voltios, pero si se conectan varios elementos en serie, la tensión nominal del rectificador puede ser aumentada.

Análogamente, por un solo elemento sólo puede pasar una corriente de intensidad limitada. Cuando se desea una corriente de más intensidad, se conectan en paralelo varios conjuntos serie para obtener la intensidad deseada de corriente.



Conectando los elementos del rectificador en paralelo o en serie, se puede obtener un rectificador de la tensión y de la intensidad nominales que se desee.

Para medir una tensión alterna con un voltímetro de c.c. se emplean unidades rectificadoras de muy pequeño volumen. Varios tipos de fuentes de alimentación para equipo electrónico y en los cargadores de baterías se emplean unidades más grandes.

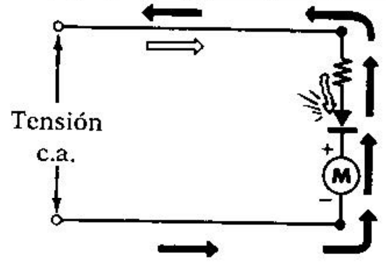
Los rectificadores metálicos son muy robustos y tienen una vida casi ilimitada si se emplean correctamente.

Medidores de c.a. del tipo rectificador *(continuación)*

Los medidores de c.a. del tipo rectificador sólo pueden ser utilizados para medir la intensidad de la corriente cuando se haya previsto un camino para ambos semiciclos de la onda de c.a., ya que de no ser así, el rectificador del medidor conectado en serie con la carga convierte la c.a. del suministro en c.c. pulsatoria.

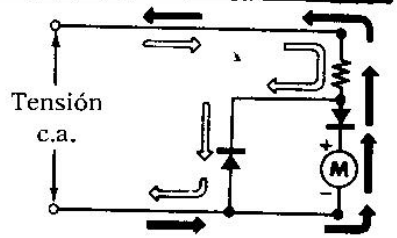
CIRCUITO SIMPLE DE MEDIDOR CON RECTIFICADOR

1. Un circuito sencillo de rectificador de medidor se compone de un resistor multiplicador, el rectificador y el mecanismo medidor conectados en serie. Durante un semiciclo la corriente pasa por el circuito del medidor; durante el semiciclo siguiente no pasa corriente, aunque exista una tensión entre los terminales del circuito incluyendo el rectificador.



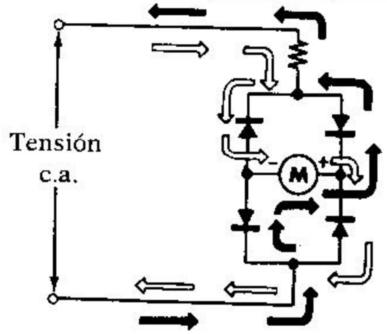
ADICION DE UN RECTIFICADOR AL CIRCUITO ANTERIOR

2. Para proveer un camino de retorno a los impulsos de corriente correspondientes a los semiciclos que no actúan sobre el mecanismo del medidor, se conecta un rectificador adicional entre los terminales del rectificador y del mecanismo medidor. Los impulsos no actuantes pasan por esta rama y no por el medidor.



CIRCUITO RECTIFICADOR TIPO PUENTE

3. Algunas veces se utiliza un circuito puente con cuatro rectificadores. Se le conecta de modo que las dos mitades o semiciclos de la onda de corriente alterna sigan caminos que conduzcan al medidor de forma que pasen por él siempre en el mismo sentido. Así, el número de impulsos de corriente que pasan por el mecanismo del medidor se duplica.



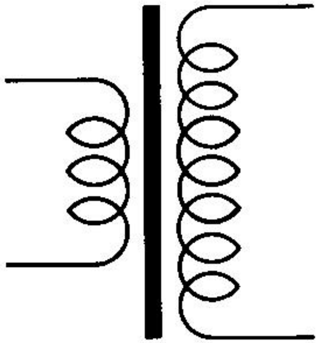
Uso de los transformadores

Como Vd. ya sabe, los transformadores se utilizan para elevar y rebajar las tensiones existentes en los extremos de una línea de suministro eléctrico. En los experimentos que siguen es necesario rebajar la tensión de la red hasta un valor adecuado para efectuar el experimento. Para ello utilizará un transformador.

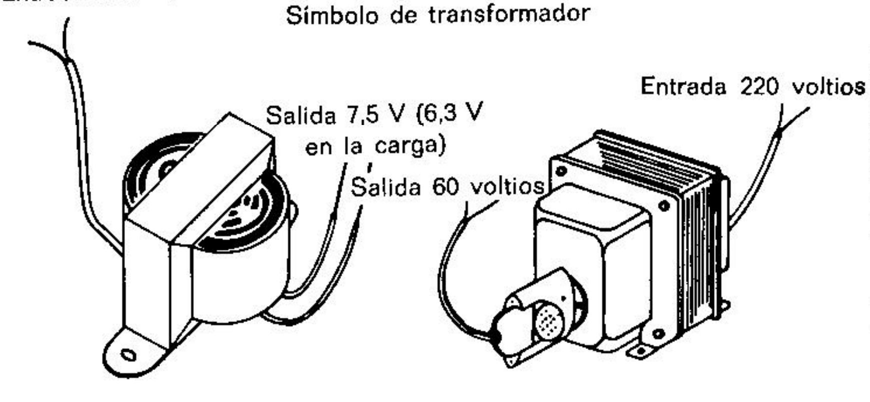
Un transformador se compone de dos bobinas de hilo próximas, pero aisladas entre sí. Si se aplica una tensión alterna a una de las bobinas, se induce en la otra una tensión alterna. Eligiendo bobinas de dimensiones adecuadas, se las puede disponer de modo que la tensión inducida en cualquiera de ellas sea igual, mayor o menor que la tensión aplicada.

La bobina a la cual se aplica la tensión se llama «primario» y la bobina en la que es inducida la tensión se llama «secundario». En este mismo volumen, estudiará más adelante los principios del transformador, y también en la parte 4.

El símbolo que se emplea para presentar un transformador en los esquemas es el que aparece abajo. También están representados los transformadores que utilizará para sus experimentos.



Símbolo de transformador



La tensión disponible en los terminales del secundario de un transformador disminuye cuando se conecta la carga entre ellos. La tensión indicada en los terminales del secundario (tensión nominal) es usualmente la tensión aplicada a la carga.

En un circuito abierto o con poca carga, la tensión disponible en los terminales es un poco más elevada que la tensión nominal.

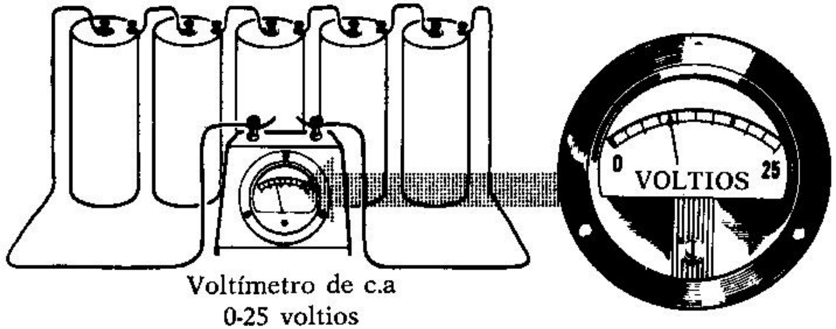
EXPERIMENTO — Voltímetro de c.a

Aunque están calibrados para lecturas de valores eficaces de tensiones de c.a. los voltímetros de c.a. sirven también para medir aproximadamente las tensiones de c.c.

Para probar esto experimentalmente, conecte cinco pilas secas formando una batería de 7,5 voltios, y utilice un voltímetro de c.c. para medir la tensión entre los terminales de la batería. Verá que la lectura indicada por los medidores es aproximadamente 7,5 voltios, dependiendo del estado de las pilas.

Luego sustituya el voltímetro de c.c. por uno de c.a. Observará que la tensión indicada es un 10% más alta aproximadamente. La razón es que, aunque el voltímetro de c.a. está calibrado en valores eficaces, la desviación de la aguja es proporcional a la corriente media que pasa por el mecanismo del medidor.

MEDICION DE LA TENSION DE UNA BATERIA CON UN VOLTIMETRO DE C.A.



Voltímetro de c.a
0-25 voltios

Suponga que, con 7,5 voltios eficaces, la intensidad media de corriente que pasa por el mecanismo es 3 mA. El valor eficaz de esta corriente será $\frac{0{,}707}{0{,}637}$ *multiplicado por 3 mA, es decir 3,33 mA. Por la ley de Ohm deducirá Vd. que la resistencia del medidor es igual a 7,5 voltios divididos por 3,33 mA, o sea 2.250 ohmios.*

Cuando se aplican 7,5 voltios de c.c., la corriente que pasa por el medidor es nuevamente 3,33 mA. El paso de esta corriente constante de 3,33 mA por el medidor tiene el mismo efecto que el que tendría el paso de una corriente alterna cuyo valor medio fuese 3,33 mA. El valor eficaz de esta corriente sería 3,7 mA.

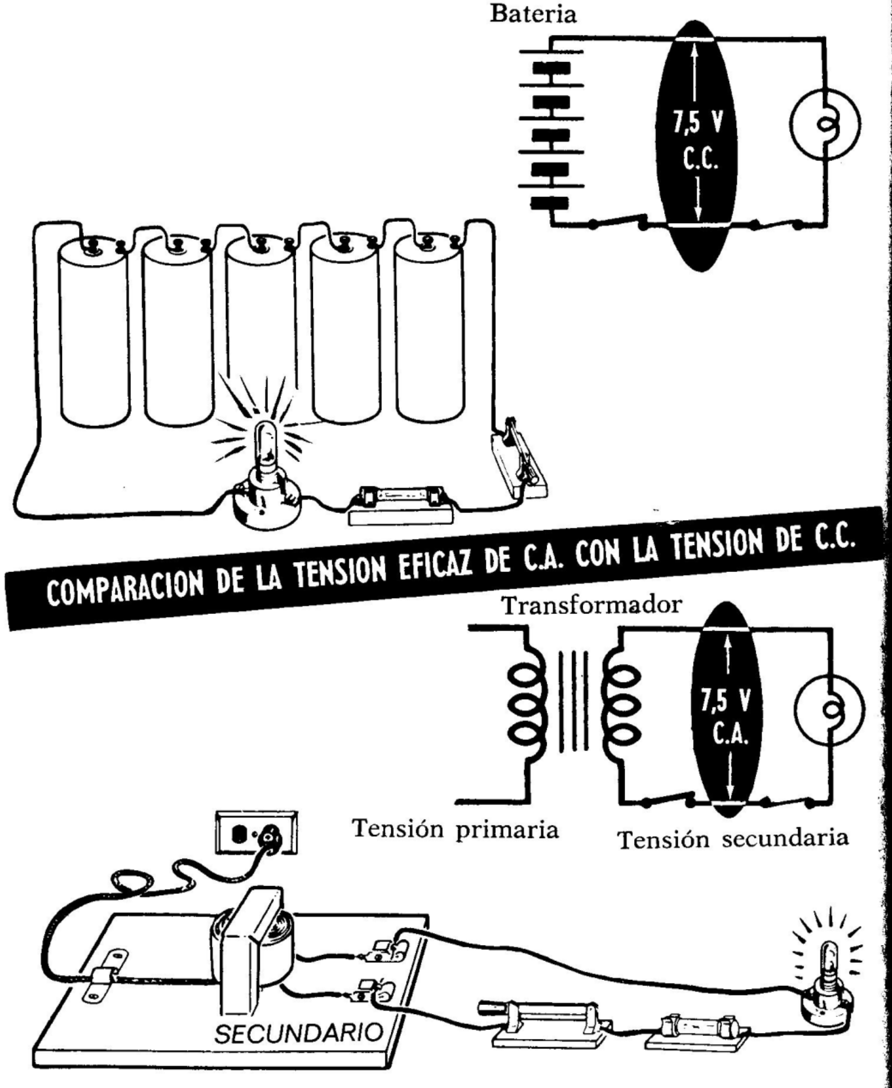
Pero una tensión eficaz de 7,5 voltios deben producir una corriente eficaz de sólo 3,33 mA. Para aumentar esta intensidad hasta 3,7 mA, la tensión c.a. de entrada tendrá que ser aumentada hasta $\frac{3{,}7}{3{,}33}$ *multiplicada por 7,5 voltios, es decir hasta 8,3 voltios aproximadamente.*

Así, cuando se aplica una c.c. de 7,5 voltios a un voltímetro de c.a., el medidor se comporta como si estuviese aplicada una tensión eficaz de 8,3 voltios. En otras palabras, dará una lectura que será un 10% mayor, aproximadamente, que la verdadera tensión.

EXPERIMENTO — Valor eficaz de una tensión de c.a.

Para comprobar experimentalmente que una tensión alterna de 7,5 voltios eficaces tiene el mismo efecto que una tensión continua de 7,5 voltios, utilice la batería de 7,5 voltios y un transformador de 7,5 voltios para encender dos lámparas del mismo tipo.

Conecte una lámpara entre los terminales de la batería, y la otra entre los terminales del secundario del transformador. Verá que el brillo de las dos lámparas es el mismo. Esto demuestra que la potencia consumida en ambos circuitos es también la misma.



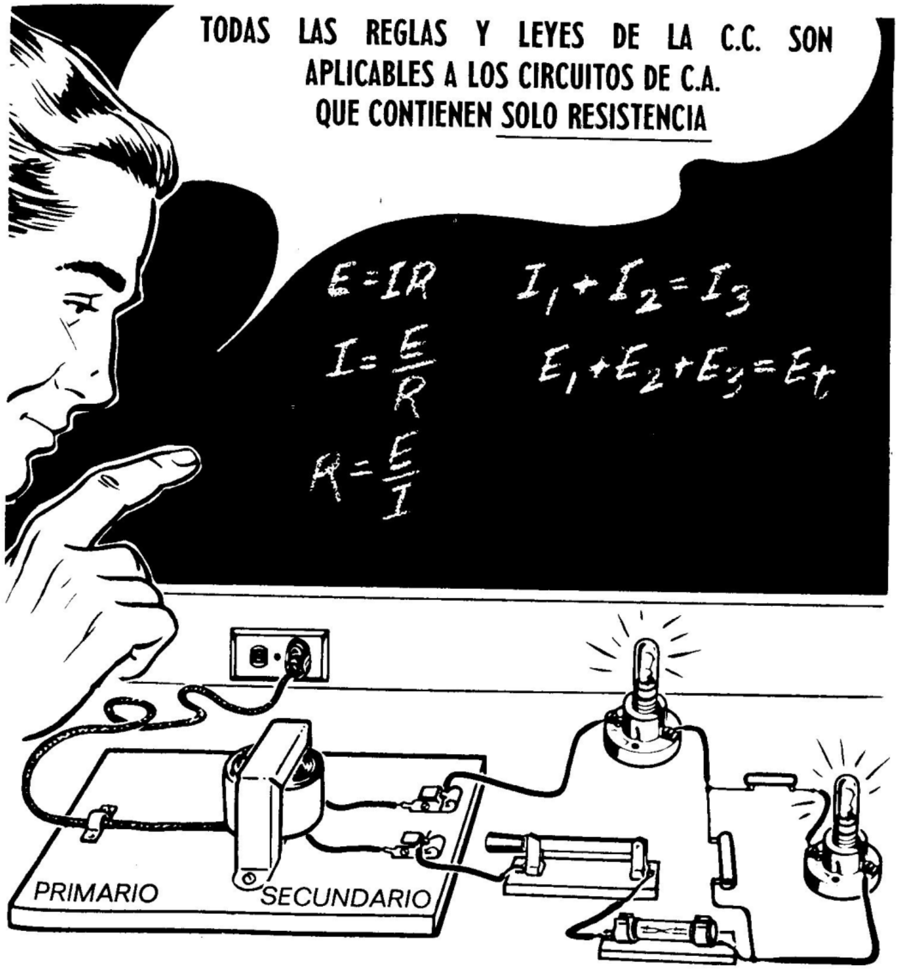
§ 3: RESISTENCIA EN CIRCUITOS DE C.A.

Circuitos de c.a. que contienen solamente resistencia

Muchos circuitos de c.a. contienen sólo «resistencia pura» y a tales circuitos son aplicables las mismas reglas y leyes que a los circuitos de c.c.

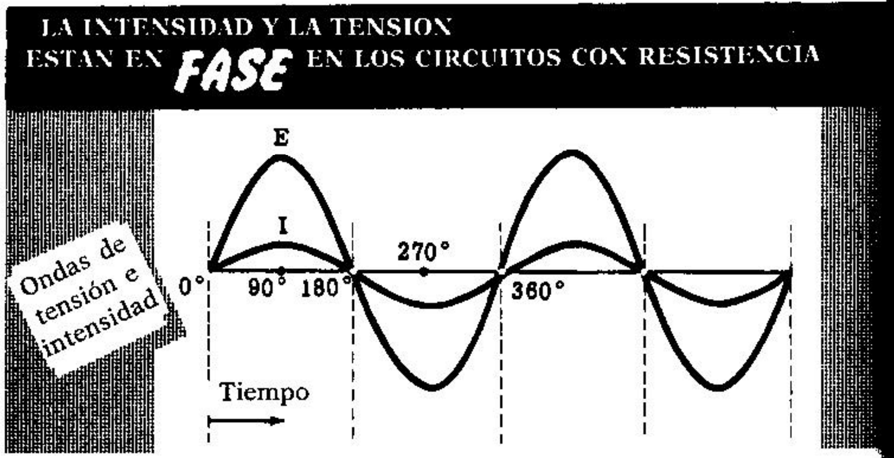
Los circuitos de resistencia pura están constituidos por dispositivos eléctricos que no contienen inductancia ni capacidad (más adelante estudiará lo que son la inductancia y la capacidad). En dispositivos tales como resistores, lámparas y elementos calefactores, los valores de su inductancia y su capacidad son despreciables, por lo que en la práctica se puede considerar que están constituidos por resistencia pura. Cuando un circuito de c.a. contiene sólo dispositivos como estos, en los cálculos que realice puede utilizar la ley de Ohm, las leyes de Kirchhoff y las reglas del circuito relativas a tensión, intensidad y potencia exactamente lo mismo que en los circuitos de c.c.

Cuando emplee las leyes y reglas relativas a un circuito de c.a., generalmente utilizará valores eficaces de tensión y de intensidad. Salvo que se especifique lo contrario, todos los valores de tensión y de intensidad de c.a. serán valores eficaces.

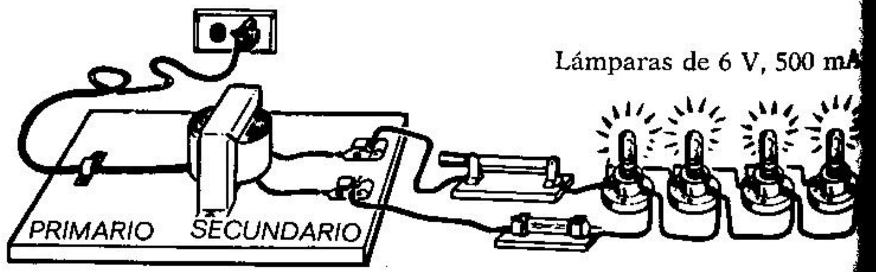


Tensión e intensidad en los circuitos con resistencia

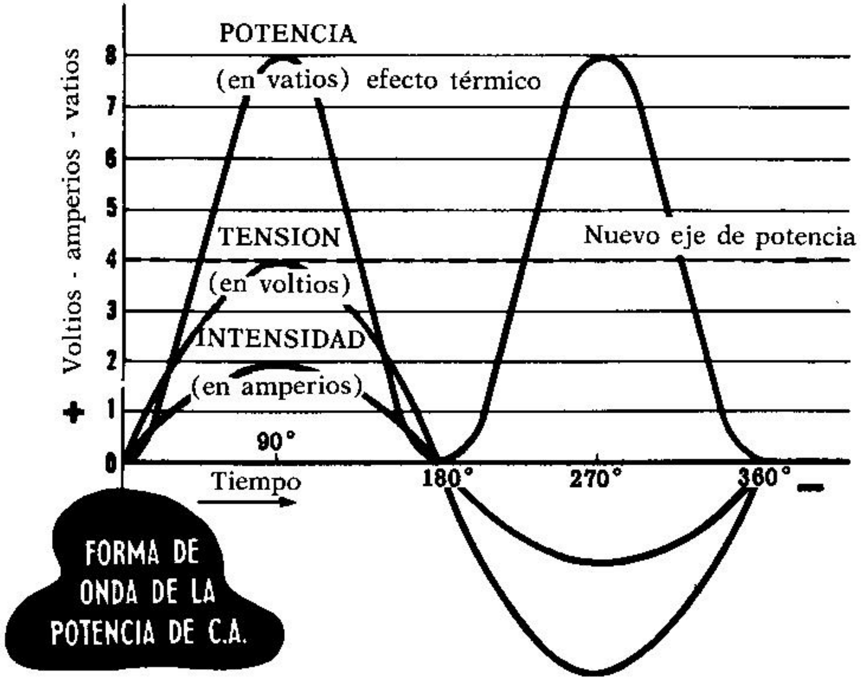
Cuando se aplica una tensión de c.a. entre los extremos de un resistor, la tensión aumenta hasta un máximo con una polaridad, disminuye hasta cero, aumenta hasta un máximo con la polaridad contraria y nuevamente disminuye hasta cero, con lo que se completa un ciclo de tensión. La intensidad de la corriente sigue exactamente a la tensión: cuando la tensión aumenta, la intensidad aumenta ; cuando la tensión disminuye, la intensidad disminuye, y en el instante en que la tensión cambia de polaridad, el sentido de la corriente se invierte. Cuando esto ocurre, se dice que las ondas de tensión y de intensidad está «en fase».



Las ondas senoidales de tensiones o intensidades están «en fase» siempre que sean de la misma frecuencia y pasen por cero simultáneamente, ambas en el mismo sentido. Sin embargo, las amplitudes de las dos ondas de tensión o de las dos ondas de intensidad que están «en fase» no tienen que ser necesariamente iguales. En el caso de ondas de intensidad y de tensión «en fase», sus amplitudes son pocas veces iguales, ya que están medidas en unidades diferentes. En el circuito abajo representado, la tensión eficaz es 6,3 voltios, y origina una corriente eficaz de dos amperios, estando «en fase» las ondas de tensión y de corriente.



Potencia en circuitos de c.a.



La potencia consumida en un circuito de c.a. es la media aritmética de todos los valores instantáneos de la potencia o efecto térmico en un ciclo completo. Todos los valores instantáneos correspondientes de tensión y de intensidad se multiplican entre sí para hallar los valores instantáneos correspondientes de potencia, los cuales pueden representarse gráficamente en función del tiempo para obtener la curva de potencia. La media de los valores instantáneos de la curva de potencia es la potencia real consumida en el circuito.

Para ondas de tensión e intensidad «en fase», todas las potencias instantáneas por encima del eje cero, y toda la curva de potencia está también sobre este eje. Esto es debido a que siempre que se multiplican dos valores positivos, el resultado es positivo, y si se multiplican dos valores negativos, el resultado es también positivo. Así, durante el primer semiciclo de E e I, la curva de potencia aumenta en sentido positivo desde cero hasta un máximo y luego disminuye hasta cero en el instante preciso en que pasan por cero las ondas «E e I». Durante el segundo semiciclo, la curva de potencia aumenta nuevamente en sentido positivo desde cero hasta un máximo, y luego disminuye hasta cero, mientras que E e I aumentan o disminuyen ambas en sentido negativo. Observe que si traza un nuevo eje a media distancia entre el valor máximo y mínimo, la frecuencia de la onda de potencia es doble que la frecuencia de las ondas de tensión y de intensidad.

Cuando se multiplican dos números menores que uno, el resultado es un número menor que cualquiera de los factores, por ejemplo, 0,5 V × 0,5 A = 0,25 W. Por esta razón, algunos o todos de los valores instantáneos de una onda de potencia puede ser menor que los correspondientes de las ondas de corriente y tensión del circuito.

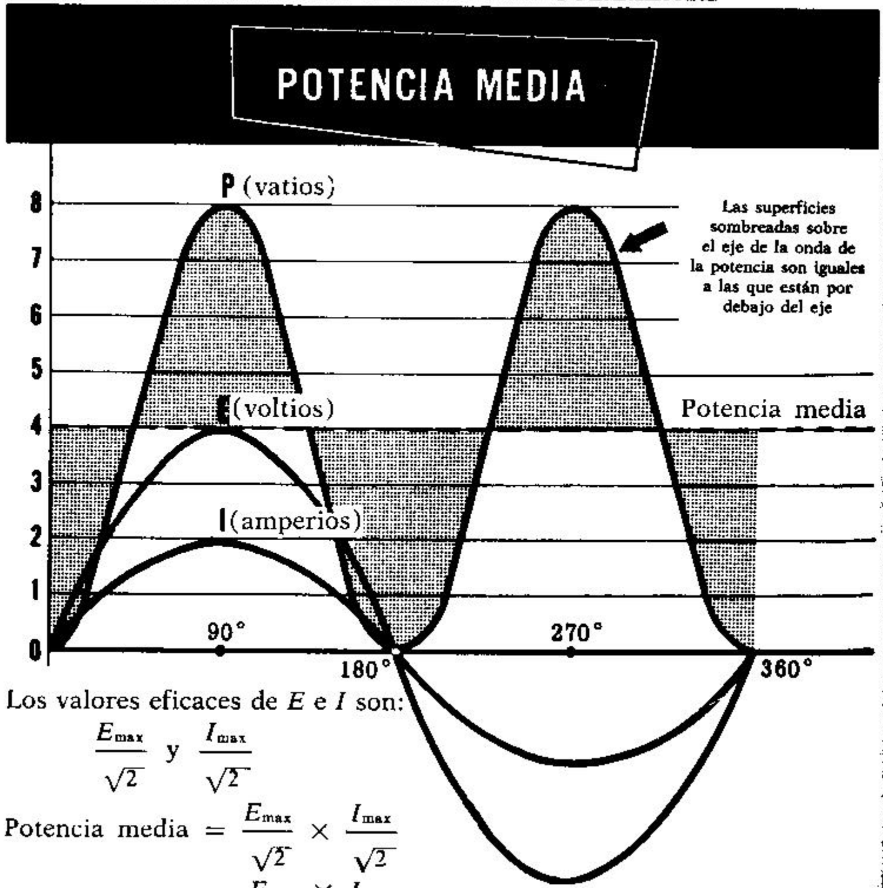
Potencia en los circuitos con resistencia

Una recta trazada horizontalmente a mitad de distancia entre los valores máximo y mínimo de la onda de potencia es el eje de esta onda. Este eje representa el valor medio de la potencia en un circuito que sólo posee resistencia, ya que las áreas sombreadas por encima de este eje son exactamente iguales a las de las superficies que queda debajo del eje. La potencia media es la potencia real consumida en un circuito de c.a.

Como todos los valores de la potencia son positivos en los circuitos de c.a. constituidos únicamente por resistencia, el eje de la onda de potencia está constituido por una paralela al eje cero (eje de las intensidades y de las tensiones), situada a una distancia mitad del valor instantáneo máximo de la potencia, siendo el valor de la potencia justamente la mitad del valor instantáneo máximo de ésta. El valor de la potencia también se puede hallar multiplicando los valores eficaces de E e I.

Recuerde que esta regla se aplica sólo a los circuitos de c.a. que contienen resistencia pura, a causa de que los circuitos de c.a. que contienen inductancia o capacidad, o ambas, pueden tener valores negativos de potencia instantánea.

CIRCUITOS CON RESISTENCIA SOLAMENTE



Los valores eficaces de E e I son:

$$\frac{E_{max}}{\sqrt{2}} \text{ y } \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Potencia media} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{E_{max} \times I_{max}}{2} = \frac{\text{Potencia máxima}}{2}$$

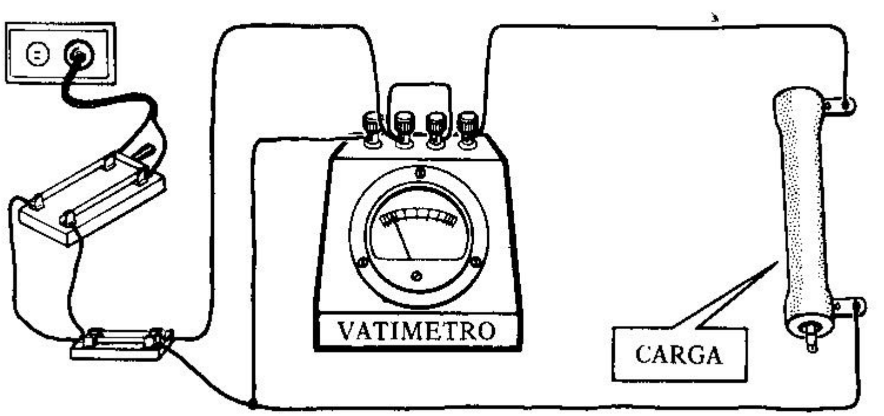
Vatímetros

Aunque la potencia se puede calcular por los valores eficaces medidos de E e I en circuitos de c.a. que contienen sólo resistencia, también se pueden medir directamente con un vatímetro. Los vatímetros no se utilizan tanto como los otros instrumentos medidores que ya conoce Vd. —voltímetros, amperímetros y óhmetros— pero para estudiar los circuitos de c.a. necesitará Vd. utilizarlos. Como los vatímetros se deterioran fácilmente si no se les conecta correctamente, debe saber cómo funcionan.

El vatímetro presenta un aspecto muy parecido al de cualquier otro tipo de medidor, excepto que la escala está calibrada en vatios y que tiene cuatro terminales, en lugar de dos. Dos de ellos son los llamados «terminales de tensión» los otros dos son los llamados «terminales de corriente». Los terminales de tensión se conectan entre los terminales del circuito, lo mismo que un voltímetro, mientras que los terminales de corriente se conectan en serie con el circuito de la misma manera que un amperímetro.

Dos terminales —uno de tensión y uno de corriente— están marcados ±. Cuando se utilice el voltímetro, estos dos terminales deben estar siempre conectados al mismo punto del circuito. Esto se efectúa ordinariamente conectándolos directamente en los terminales del vatímetro.

Para medir potencias de c.a. o de c.c., esta unión común (±) se conecta a cualquiera de los conductores de la línea de potencia. El terminal de tensión (V) se conecta al otro conductor de la línea. El terminal de corriente (A) se conecta a la resistencia de carga que consume potencia.

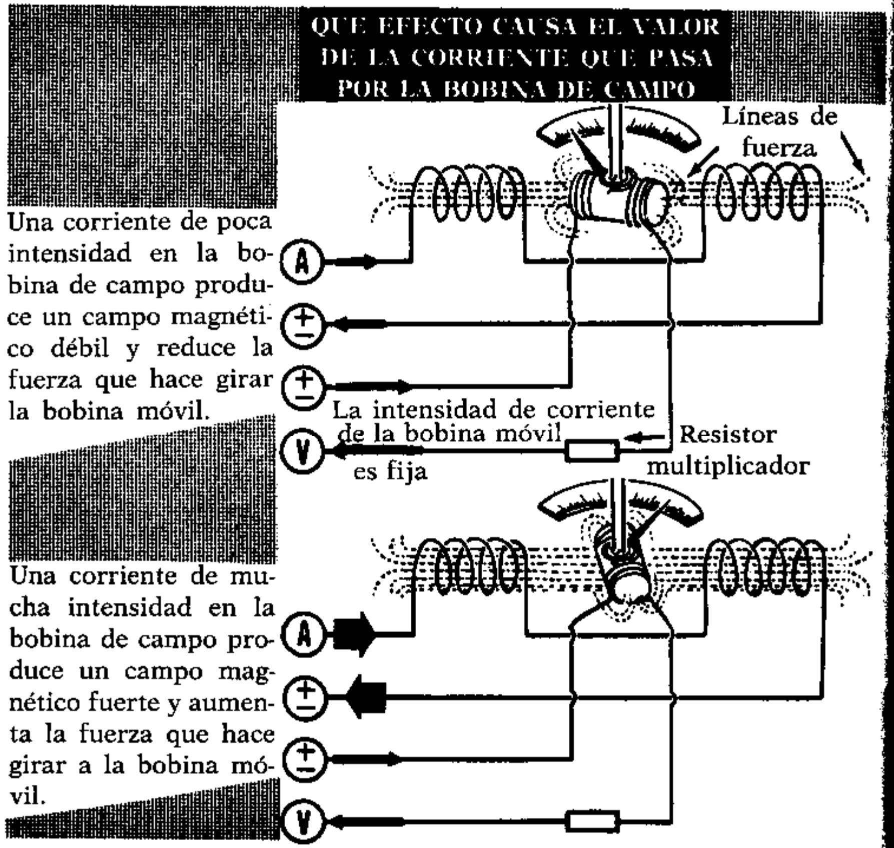


Vatímetros *(continuación)*

Los vatímetros no se construyen con el mecanismo básico medidor de bobina móvil que Vd. ya conoce. En su lugar utilizan un mecanismo del tipo de dinamómetro, que difiere del otro tipo en que no tiene imán permanente que provea campo magnético. El campo se obtiene mediante dos bobinas, convenientemente dispuestas, llamadas de campo, que están colocadas una frente a otra lo mismo que los polos de los imanes permanentes en el otro tipo de medidor.

Estas bobinas de campo están conectadas en serie entre los terminales de corriente del vatímeto, por lo que la corriente del circuito pasa por estas bobinas cuando se efectúan las mediciones. Una corriente de intensidad elevada hace que las bobinas de campo actúen como fuertes imanes, mientras que una corriente de poca intensidad hace que actúen como imanes débiles. Como la intensidad o fuerza del campo magnético del medidor depende del valor de la intensidad de la corriente del circuito, las lecturas del vatímetro varían cuando varía la intensidad de corriente en el circuito.

Para una tensión fija, la aguja del medidor se desviará mucho si la intensidad de la corriente es elevada, y poco si es pequeña.



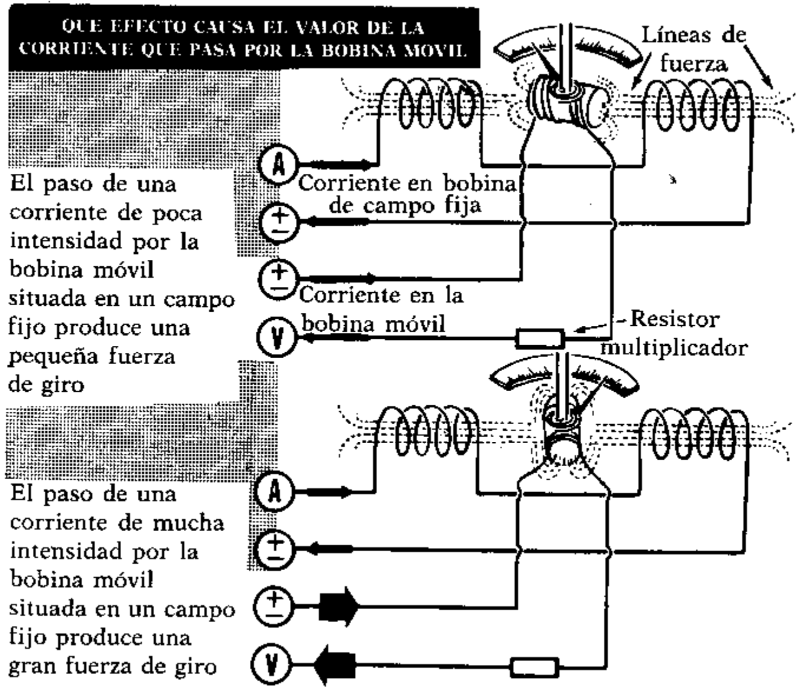
Vatímetros *(continuación)*

La bobina móvil del vatímetro es análoga a las utilizadas en los mecanismos básicos de medidor ya estudiados, y está conectada en serie con un resistor multiplicador, que el vatímetro lleva en su interior, entre los terminales de tensión. Los terminales de tensión del vatímetro se conectan respectivamente a los dos puntos de tensión del circuito de la misma manera que un voltímetro, y el resistor multiplicador limita la intensidad de la corriente que pasa por la bobina móvil.

Como la resistencia del multiplicador es fija, la intensidad de la corriente que pasa por él, así como por la bobina móvil, varía con la tensión del circuito. Una tensión alta hace que pase más corriente por el multiplicador y la bobina móvil que cuando la tensión es baja.

Para un campo magnético dado, determinado por la intensidad de corriente del circuito (corriente que pasa por la carga), la fuerza que hace girar la bobina móvil depende de la intensidad de la corriente que pasa por la bobina móvil. Como el valor de esta intensidad depende de la tensión del circuito, la lectura del medidor varía cuando varía la tensión en el circuito.

Así, pues, las lecturas del medidor dependen de la tensión y de la corriente del circuito y variará si el valor de cualquiera de ellas varía. Como la potencia depende tanto de la tensión como de la intensidad, el medidor mide la potencia.

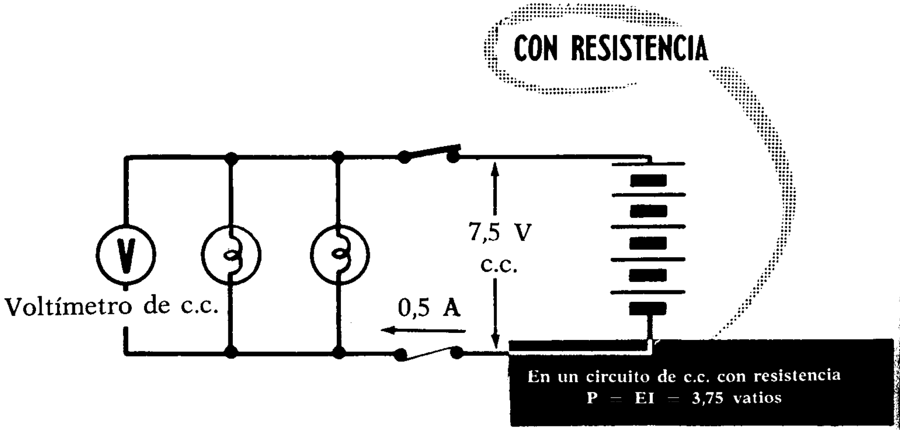


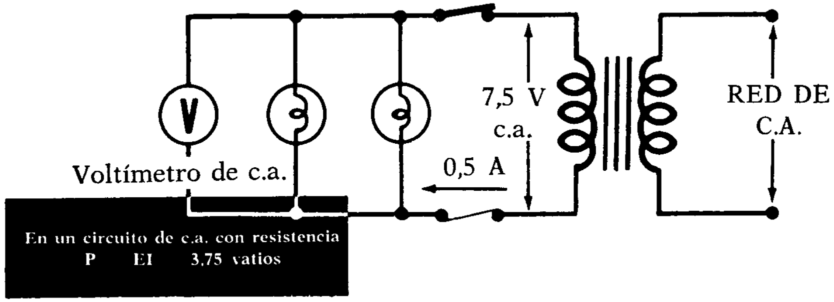
Aunque aparentemente de la anterior descripción se pueda deducir podría utilizarse el mismo vatímetro para medir la potencia en circuitos de c.a. y de c.c., a causa de los problemas que plantea su construcción, los medidores suelen estar destinados a medir potencias de c.a. o bien de c.c. pero no de las dos. Los vatímetros en que se hace uso de este principio sólo se pueden utilizar para medir la potencia en circuitos en que la frecuencia de la tensión y de la corriente no exceda de 120 Hz. Para frecuencias más altas tienen que emplearse otros métodos de medición de potencia, métodos que estudiará Vd. más adelante.

EXPERIMENTO — Potencia en c.a. en los circuitos con resistencia

Para comprobar que puede utilizar los valores eficaces de tensión y de intensidad de c.a. para determinar la potencia consumida en circuitos con resistencia de la misma manera que utilizaba los valores de c.c., conecte dos portalámparas en paralelo entre los terminales de una batería de 7,5 voltios, formada por pilas secas en serie. A continuación conecte un voltímetro de c.c., cuya escala sea 0-10 voltios, entre los terminales de la lámpara para medir la tensión del circuito. Inserte en los portalámparas lámparas de 6 voltios especificadas para 250 mA y observe que todas las lámparas se encienden con el mismo brillo. Cada una de ellas da paso a una corriente de 0,5 amperio, mientras la tensión sea aproximadamente 7,5 voltios. Utilizando la fórmula de la potencia (P = EI), sabe que la potencia es 7,5 × 0,5, o sea, 3,75 vatios.

COMPARACION DE LA POTENCIA CONSUMIDA POR CIRCUITOS





Luego desconecte la batería y sustituya el voltímetro de c.c. por uno de c.a. del mismo alcance, utilizando como fuente de tensión de c.a. el transformador de 7,5 voltios, y verá Vd. que las lámparas se encienden con el mismo brillo que como antes en el circuito de c.c. Observe que la lectura del voltímetro es casi la misma que la obtenida utilizando c.c., aproximadamente 7,5 voltios.

Aplicando la fórmula de la potencia, la potencia en el caso de c.a. es 7,5 × 0,5, o sea, 3,75 vatios, igual a la potencia de c.c. que producía la misma intensidad luminosa.

EXPERIMENTO — Potencia en c.a. en los circuitos con resistencia (continuación)

Ahora verá que el vatímetro mide la potencia consumida por una carga, si está correctamente conectado en el circuito. Utilice un transformador reductor, de 240 a 60 voltios, un interruptor, fusibles, un resistor de 150 ohmios, 100 vatios, un miliamperímetro de 0-500 mA, y un voltímetro de escala 0-100 voltios y un vatímetro de escala de 0-50 vatios.

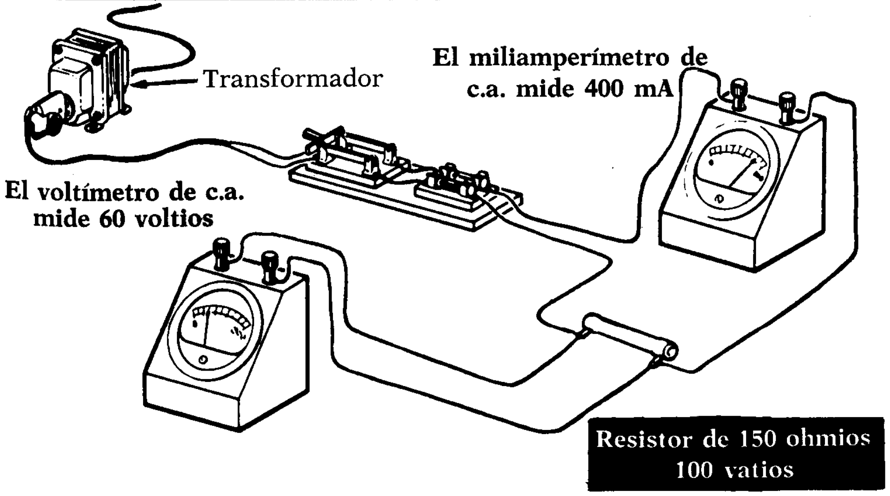
Todos los medidores serán de c.a.

Mida primero la potencia consumida en el resistor, utilizando el voltímetro y el amperímetro y comparando el resultado con el obtenido utilizando el vatímetro.

Conecte el interruptor, el fusible, el amperímetro y el resistor en serie, entre los terminales del secundario del transformador, y con este voltímetro entre los terminales del resistor. Cuando el primario del transformador está conectado a la red de suministro y el interruptor está cerrado, observará que el amperímetro indica el paso de una corriente de 0,4 amperio por el resistor, y que el voltímetro indica tensión de 60 voltios entre los terminales del resistor. El resistor se calentará excesivamente si se deja cerrado el interruptor durante un largo tiempo; por eso debe abrir el interruptor tan pronto como tome las lecturas. Repita el experimento y halle la media de las lecturas del amperímetro.

Calculando la potencia consumida por el resistor, verá que es aproximadamente 24 vatios. Suponiendo que la tensión es 60 voltios y que la corriente es de 0,4 amperio exactamente, la potencia será 60 × 0,4, o sea, 24 vatios. Los resultados reales pueden diferir ligeramente, dependiendo de la exactitud de las lecturas de tensión y de intensidad que se obtengan.

CALCULO DE LA POTENCIA DE C.A. CONSUMIDA POR UN RESISTOR

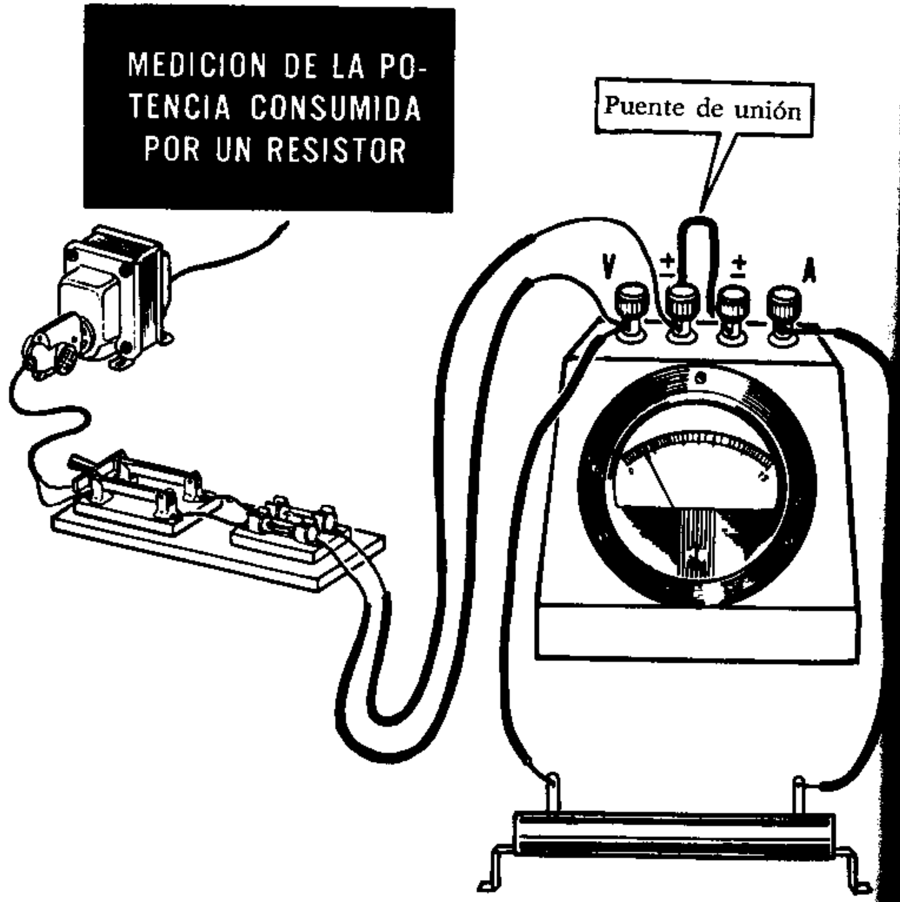


En un circuito con resistencia P = EI
La potencia consumida es aproximadamente 24 vatios

EXPERIMENTO — Potencia en c.a. en los circuitos con resistencia (continuación)

Ahora retire el miliamperímetro y el voltímetro del circuito y conecte el vatímetro para medir directamente la potencia consumida por el resistor. Para ello, conecte previamente entre sí, mediante un trozo de hilo conductor, los dos terminales del vatímetro marcados ±, formando un solo terminal común que conectará mediante un conductor a uno de los portafusibles, conectando el otro portafusibles al terminal marcado V. El resistor lo conectará a los terminales de tensión y de corriente marcados V y A respectivamente, según puede ver en la figura.

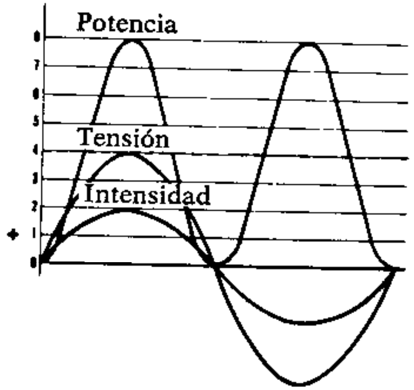
Cuando haya realizado todas las conexiones, conecte el primario del transformador a la red de suministro de c.a. y cierre el interruptor. Verá que el vatímetro indica un consumo de 24 vatios aproximadamente. La lectura en vatios variará ligeramente cuando el resistor se calienta y cambia de valor, pero permanece estacionaria cuando la temperatura del resistor se estabiliza. Observe que la potencia medida es casi la misma que la obtenida utilizando un voltímetro y un amperímetro, y que los dos resultados se pueden considerar iguales en todas las aplicaciones prácticas.



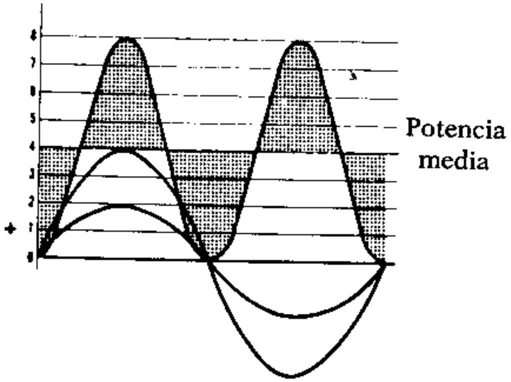
REPASO de resistencia en los circuitos de c.a.

Las propiedades de los circuitos con resistencia, en cuanto se refiere a la potencia de c.a., que ha aprendido Vd. le ayudarán a comprender las propiedades de otros circuitos de c.a. que no están constituidos exclusivamente por resistencia.

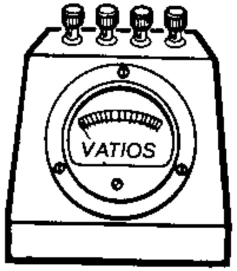
Onda de potencia de c.a. **Haga un gráfico de todos los valores de la potencia instantánea.**



Potencia media. **Valor igual al correspondiente al eje de simetría de la onda de potencia.**



Vatímetro. **Medidor utilizado para obtener directamente el valor de la potencia, cuando está conectado en un circuito.**



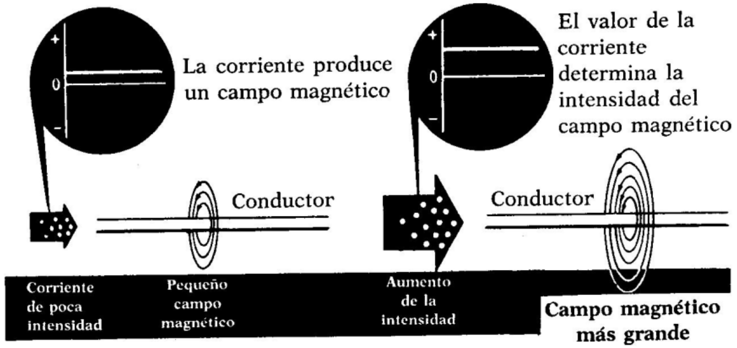
Recuerde que la fórmula de la potencia ($P = EI$) se puede utilizar para hallar la potencia consumida en un circuito de c.a. con resistencia, siempre que se utilicen los valores de E e I.

§ 4: INDUCTANCIA EN LOS CIRCUITOS DE C.A.

F.E.M. de autoinducción

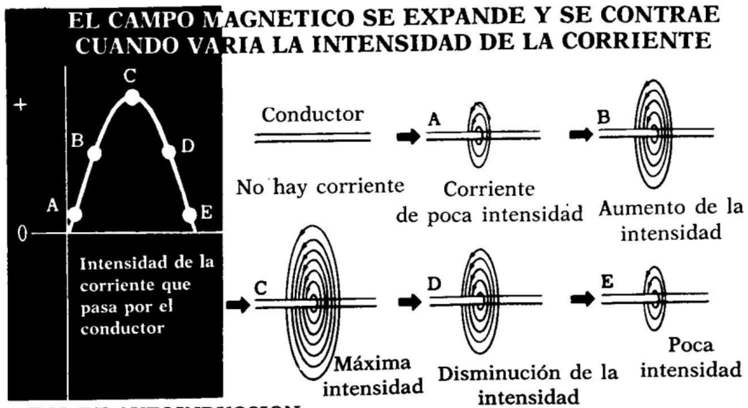
Cuando en un circuito eléctrico varía el valor de la intensidad de la corriente que lo recorre, el circuito tiende a oponerse a que se realice dicha variación. Esta propiedad que tiene el circuito de oponerse a dicha variación es lo que se llama «inductancia».

Una corriente eléctrica siempre produce un campo magnético. Las líneas de fuerza de este campo circundan al conductor por el que pasa la corriente, formando circunferencias concéntricas alrededor del conductor. La intensidad o fuerza del campo magnético depende de la intensidad de la corriente y una corriente de mucha intensidad produce muchas líneas de fuerza, mientras una corriente de poca intensidad sólo produce pocas líneas de fuerza.



Cuando la intensidad aumenta o disminuye, la intensidad del campo magnético también aumenta o disminuye, respectivamente, en el mismo sentido. Cuando la intensidad del campo aumenta, aumenta el número de líneas de fuerza y éstas se expanden hacia afuera desde el centro del conductor. Análogamente, cuando la intensidad del campo disminuye, las líneas de fuerza se contraen hacia el centro del conductor.

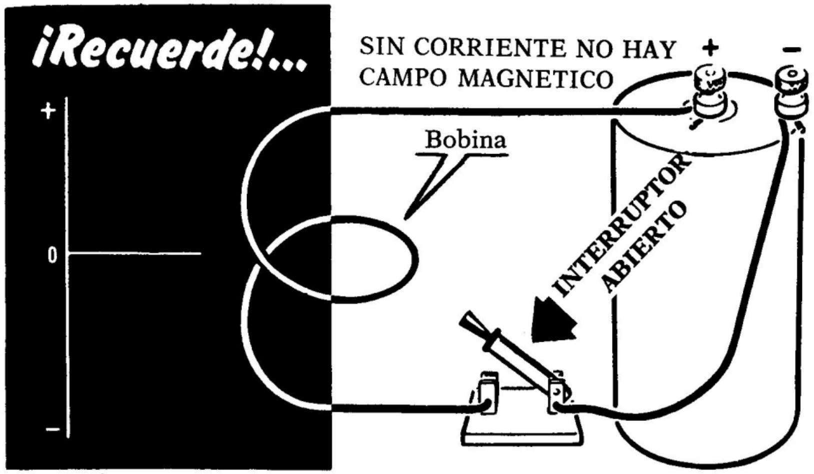
Esta expansión y contracción del campo magnético que se produce al variar la corriente, produce una «f.e.m. de autoinducción» o «fuerza contraelectromotriz» (f.c.e.m.) cuyo efecto es oponerse a cualquier variación que se produzca en el valor de la intensidad de la corriente.



F.E.M. DE AUTOINDUCCION
COMO SE PRODUCE EL EFECTO DE LA INDUCTANCIA

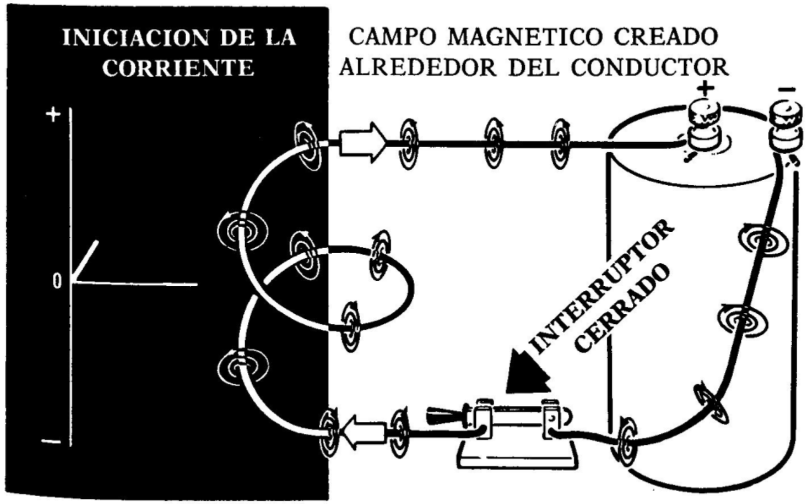
Inductancia en un circuito de c.c.

Suponga que un circuito contiene una bobina como la representada en la figura. En tanto esté el interruptor abierto, no habrá corriente ni tampoco existirá campo alrededor de los conductores del circuito.



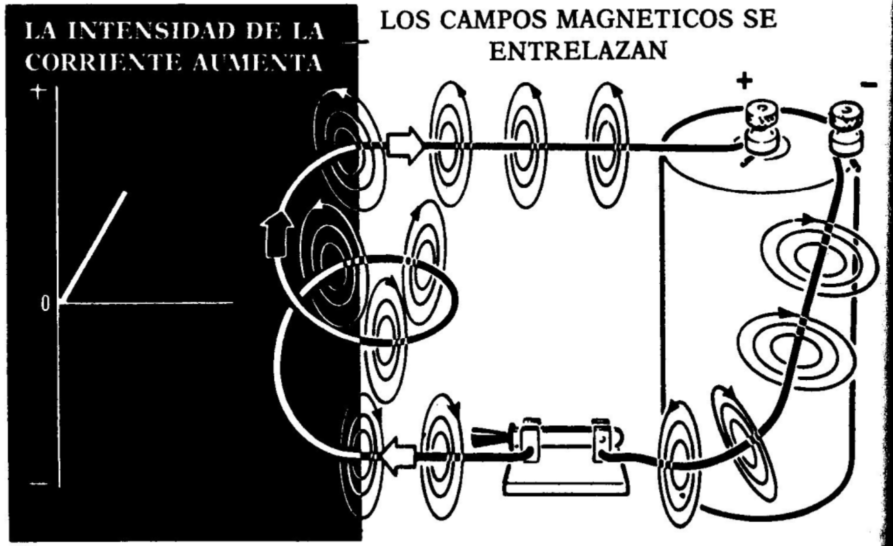
Cuando se cierra el interruptor, pasa corriente por el circuito, y las líneas de fuerza del campo se expanden hacia afuera alrededor de los conductores del circuito, incluyendo las espiras de la bobina. Tan pronto como se cierra el interruptor, empieza a establecerse la corriente aumentando su intensidad desde 0 hasta su máximo valor, aunque este aumento, por muy rápido que sea, no puede ser instantáneo.

Imagine, por un momento, que pudiese ver realmente las líneas de fuerza del circuito en el instante en que se inicia la corriente. Vería que forman un campo magnético alrededor de los conductores del circuito.

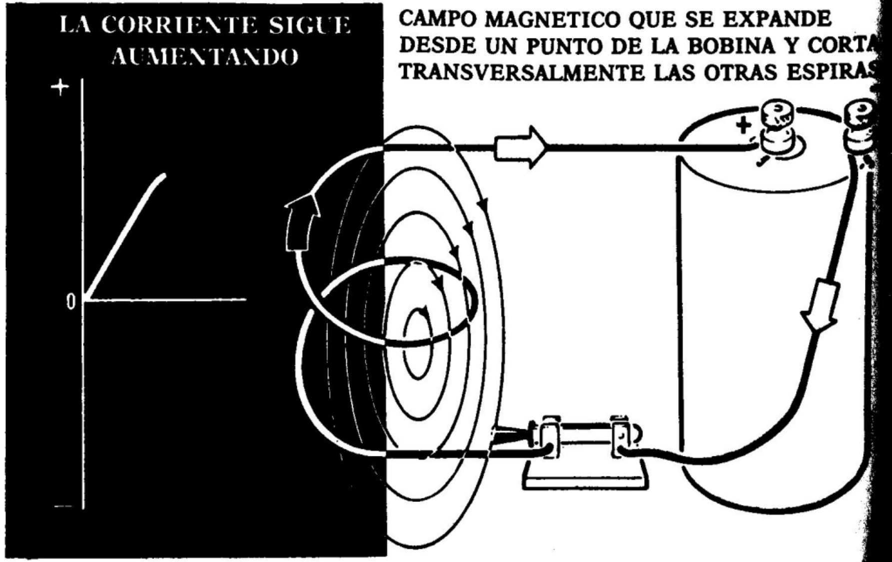


Inductancia en un circuito de c.c. *(continuación)*

Como la intensidad de la corriente continúa aumentando, las líneas de fuerza continúan expandiéndose, entrelazándose los campos magnéticos formados por las espiras adyacentes.



Las líneas de fuerza que rodean cada espira, continúan expandiéndose y, al hacerlo así, cortan a las espiras adyacentes de la bobina. Esta expansión continúa mientras siga aumentando la intensidad de la corriente del circuito, por lo que cada vez más líneas de fuerza que rodean a cada espira de la bobina cortan a las espiras adyacentes de ésta.

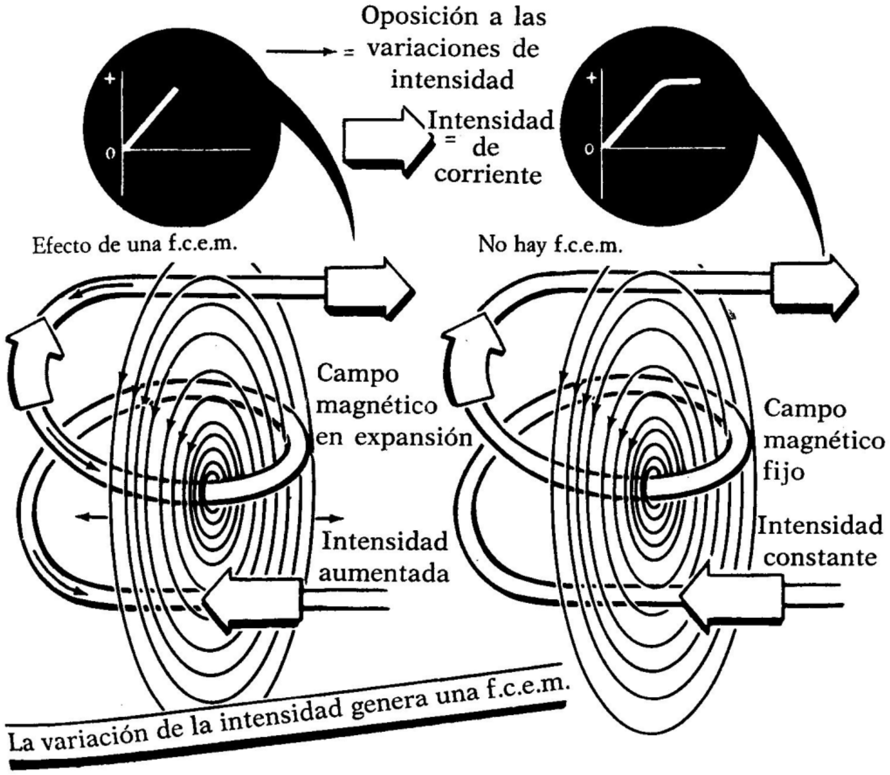


Inductancia en un circuito de c.c. *(continuación)*

Siempre que un campo magnético se mueve transversalmente a un hilo, induce en él una f.e.m. Siempre que pasa corriente por una bobina, produce un campo magnético que corta a su vez a las espiras de ésta. Siempre que cambia el sentido de la corriente, cambia el sentido del campo magnético; la f.e.m. creada por las variaciones de este campo magnético, en el que se hallan las espiras de la bobina, se opone a la variación de la corriente.

La variación inicial de la intensidad de la corriente está originada por la f.e.m., o tensión, entre los extremos de la bobina; por ésto a esta fuerza de oposición se la denomina «fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.)» o «f.e.m. de autoinducción».

La inductancia es la propiedad del circuito, y en particular de una bobina, de generar una f.e.m. de autoinducción que se opone a las variaciones de intensidad de corriente.



Cuando la intensidad alcanza su máximo valor, determinado por la tensión y la resistencia del circuito, ya no cambia más de valor, y el campo tampoco se expande más; entonces tampoco se induce f.c.e.m. Este campo permanece constante o estacionario, pero si la corriente aumenta o disminuye, el campo se expande o se contrae, y se generará una f.e.m. que se opondrá a las variaciones de la corriente.

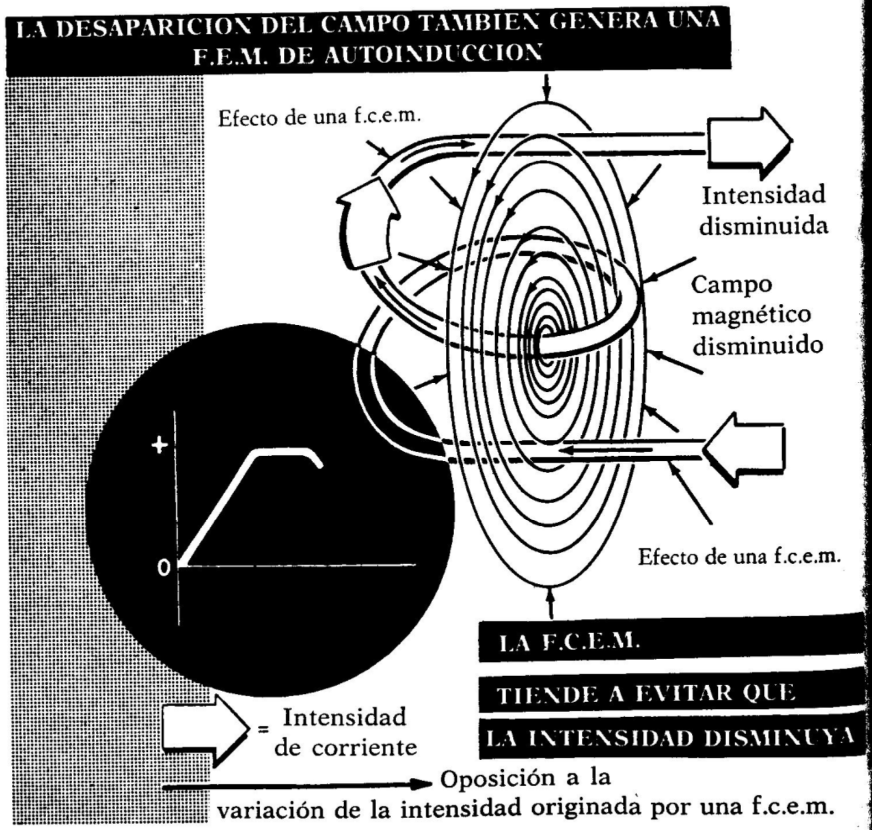
Con corriente continua la inductancia sólo afecta a la intensidad de la corriente en el momento de establecerse o interrumpirse el circuito ya que sólo en estos instantes varía la intensidad.

Inductancia en un circuito de c.c. *(continuación)*

Cuando la corriente y el campo magnético han alcanzado sus valores máximos, ya no se induce fuerza contraelectromotriz, pero si se disminuye la tensión o se aumenta la resistencia del circuito, la intensidad de la corriente disminuye. Suponga que la tensión de la fuente de alimentación disminuye: la intensidad disminuye hasta un nuevo valor de acuerdo con la ley de Ohm, determinado por los valores de E y R. Cuando la intensidad disminuye, el campo magnético también disminuye, y cada línea de fuerza se contrae hacia el conductor. Este campo en contracción corta transversalmente a las espiras de la bobina en sentido contrario al que lo hizo cuando se produjo el aumento de intensidad de la corriente en el circuito.

Puesto que se invierte el sentido en el que las líneas del campo magnético cortan a las espiras, la extinción del campo genera una fuerza contraelectromotriz opuesta a la originada por la expansión del campo, por lo que ésta tendrá ahora la misma polaridad que la tensión de la fuente. Los efectos de esta f.e.m. de autoinducción se sumarán, por lo tanto, a la tensión de la fuente, tendiendo a impedir la disminución de la intensidad, aunque no podrá impedirlo indefinidamente, ya que la f.c.e.m. desaparece cuando la intensidad deja de variar.

De esta manera, la inductancia —el efecto de la f.e.m. de autoinducción— se opone a cualquier variación de la intensidad, ya sea aumento o disminución, disminuyendo la velocidad de la variación.

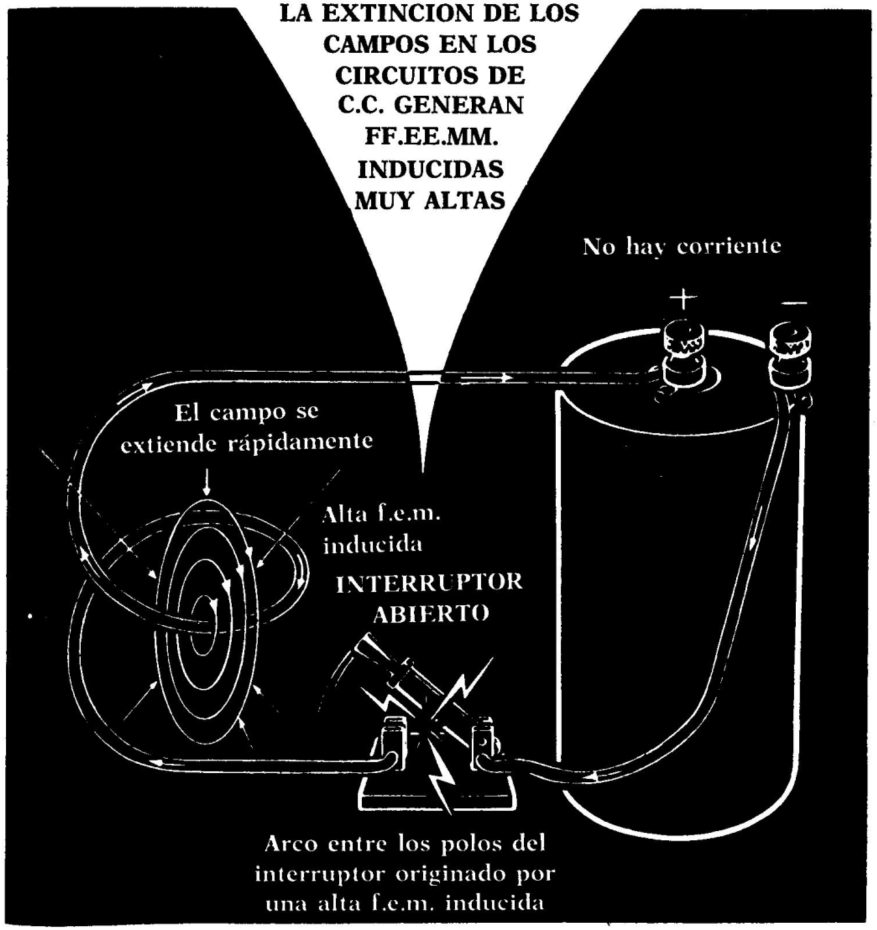


Inductancia en un circuito de c.c. *(continuación)*

Mientras el circuito esté cerrado, la corriente mantiene su valor correspondiente a la ley de Ohm y no se genera f.e.m. inducida. Suponga ahora que abre el interruptor para que cese la corriente. La intensidad de esta corriente se anulará, pero no lo hace inmediatamente, si no con un ligero retardo, y además salta una chispa entre los contactos del interruptor.

Cuando se abre el interruptor, la corriente disminuye rápidamente hacia cero y el campo también se extingue a muy rápida velocidad. El campo magnético en rápida extinción genera una f.e.m. inducida muy alta, que no sólo se opone a la variación de la corriente, sino que origina una chispa entre los terminales del interruptor como si se esforzase en mantener la corriente.

Aunque sólo momentáneamente, la f.e.m. inducida por esta rápida extinción del cambio es ciertamente muy elevada, pudiendo ser muchas veces mayor que la propia tensión de la fuente. Este efecto se aprovecha a menudo en tipos especiales de equipos destinados a obtener tensiones muy altas.



Inductancia en un circuito de c.c. *(continuación)*

La inductancia se opone a las variaciones de la intensidad en un circuito, cualquiera que sea el sentido de la variación. Mientras la intensidad está aumentando, se está «almacenando» energía por la creación de un campo magnético alrededor de los conductores del circuito. Esta energía es cedida o devuelta por el campo magnético cuando la intensidad de la corriente disminuye.

EN UN CIRCUITO INDUCTIVO

CUANDO LA INTENSIDAD DE CORRIENTE AUMENTA, EL CIRCUITO ALMACENA ENERGIA EN EL CAMPO MAGNETICO

CUANDO LA INTENSIDAD DISMINUYE, EL CIRCUITO CEDE ENERGIA AL CAMPO MAGNETICO

Esta acción es comparable a la aceleración y la marcha en rueda libre de un ciclista. Suponga que está Vd. paseando en bicicleta por una calzada bien pavimentada y sin desnivel a velocidad de 12 km/hora. Si desea marchar a 18 km/hora tendrá que pedalear más, lo suficiente para alcanzar la nueva velocidad. Pero no se desplazará inmediatamente a 18 km/hora tan pronto como inicie un mayor esfuerzo para pedalear, con mayor rapidez, si no que tardará algún tiempo en alcanzar esta velocidad.

Si cuando alcanza la velocidad de 18 km/hora deja de pedalear, es decir, su bicicleta marcha en rueda libre, ésta no se parará inmediatamente si no que, suponiendo que no haga viento y que la máquina esté bien engrasada, continuará avanzando durante un tiempo considerable. Como Vd. no está suministrando energía en los pedales, es evidente que la energía, por la cual sigue marchando la bicicleta, proviene de alguna otra fuerte. Efectivamente, lo que ocurre es que está Vd. utilizando la energía «almacenada». Esta energía se almacenó cuando pedaleó Vd. para acelerar. Parte de la energía que transmitió a los pedales fue almacenada por su bicicleta.

De la misma manera cuando una fuente de energía está conectada a un circuito inductivo, no toda la energía disponible se consume en producir la corriente. Así como el esfuerzo adicional aplicado a los pedales de su bicicleta no hace que cambie la velocidad de ésta inmediatamente, de 12 km/hora a 18 km/hora, un cambio de la energía eléctrica disponible en los terminales de un circuito inductivo no hace que varíe inmediatamente la intensidad. El circuito almacena energía de la misma manera que la almacenó la bicicleta.

Este almacenamiento de energía en el circuito tiene lugar creando un campo magnético alrededor del conductor. Si se conecta al circuito una fuente adicional de energía, parte de la energía adicional disponible es almacenada por el circuito mediante el aumento del campo magnético.

La energía así almacenada queda disponible para contribuir al mantenimiento de la corriente durante el tiempo que la energía eléctrica de la fuente disminuye o cesa. En el caso extremo descrito en la página 3.43 la energía almacenada en el circuito se ha disipado en forma de calor por el arco producido en el interruptor.

Símbolos de inductancia

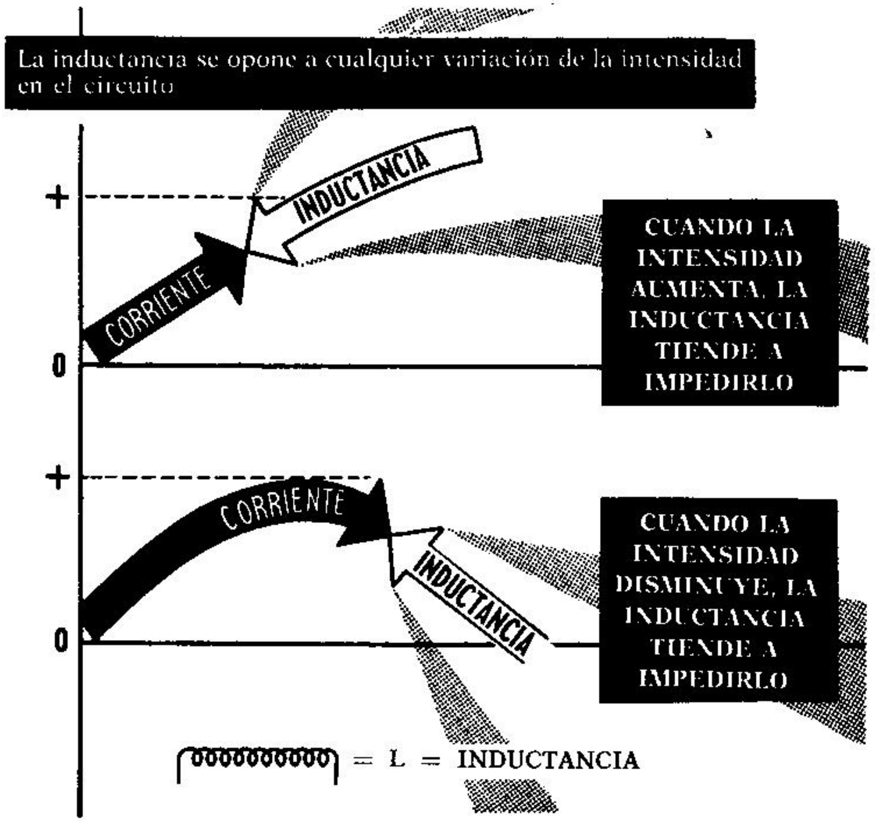
Aunque materialmente no sea posible ver la inductancia, está presente en todo el circuito eléctrico, y ejerce su acción sobre el circuito siempre que varía la intensidad de la corriente.

En las fórmulas de electricidad se emplea la letra L como símbolo para designar la inductancia.

Debido a que una bobina de hilo presenta una inductancia mucho mayor que un trozo recto del mismo hilo, generalmente al referirnos a una bobina lo hacemos con el nombre de «inductancia». Así, en lugar de decir «una bobina» suele también decirse «una inductancia».

Como la corriente continua es normalmente una corriente de intensidad constante, excepto en los momentos en que se establece o se interrumpe, la inductancia afecta a la intensidad de la corriente continua sólo en dichos instantes, y ordinariamente su afecto es mínimo durante el funcionamiento del circuito. En cambio, la corriente alterna está variando continuamente, por lo que la inductacía del circuito afecta a la c.a. en todos los instantes.

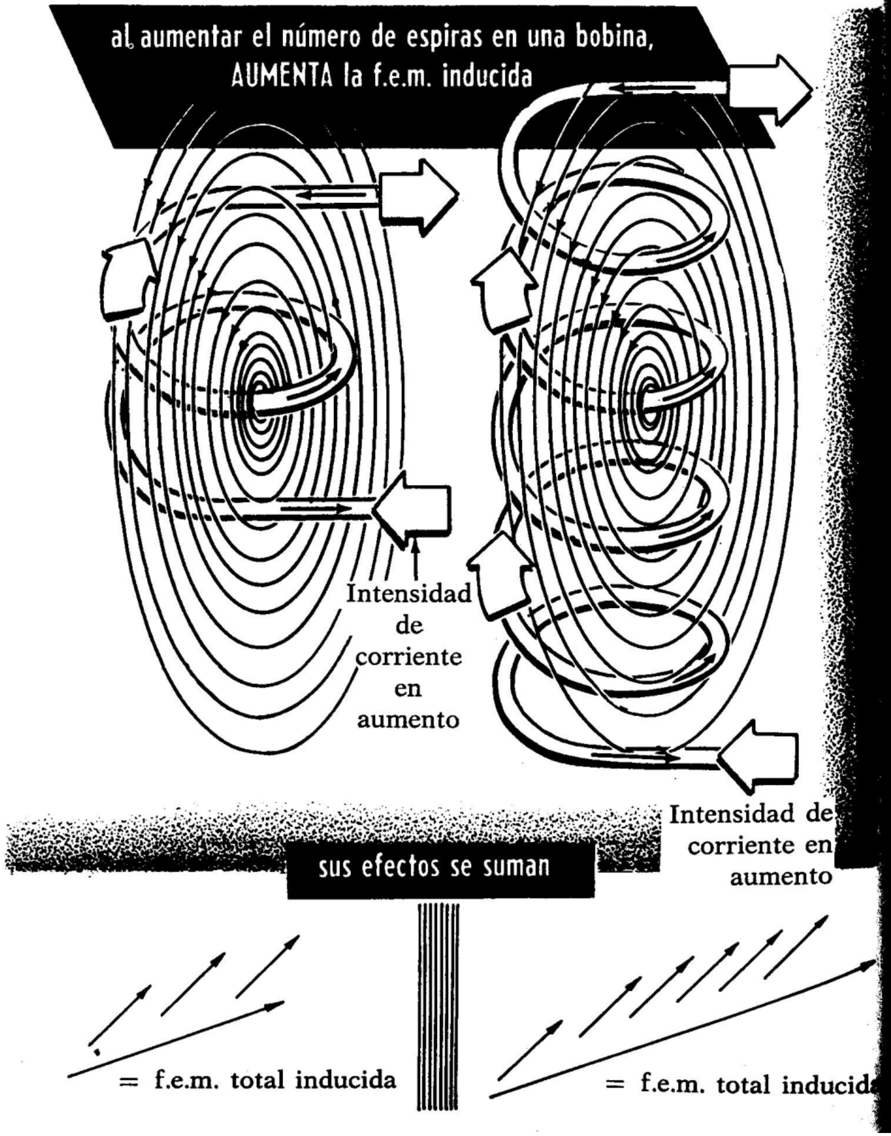
Aunque todo circuito tiene una inductancia, el valor de ésta depende de la construcción del circuito y de los dispositivos eléctricos que en él se utilicen. En algunos circuitos la inductancia es tan pequeña que su efecto es despreciable, incluso cuando circulan en ellos una corriente alterna.



Factores que afectan a la inductancia

Todo circuito eléctrico completo posee alguna inductancia, ya que el circuito más sencillo forma un bucle completo o una bobina de una sola espira. Incluso en un trozo de hilo recto se induce una fuerza contraelectromotriz por la acción del campo magnético que se forma a su alrededor, expandiéndose desde el centro del hilo o contrayéndose hacia el centro de éste. Cuanto mayor es el número de espiras que las líneas del campo magnético cortan al expanderse, mayor es la f.c.e.m. inducida, por lo que una bobina que tenga muchas espiras posee una alta inductancia.

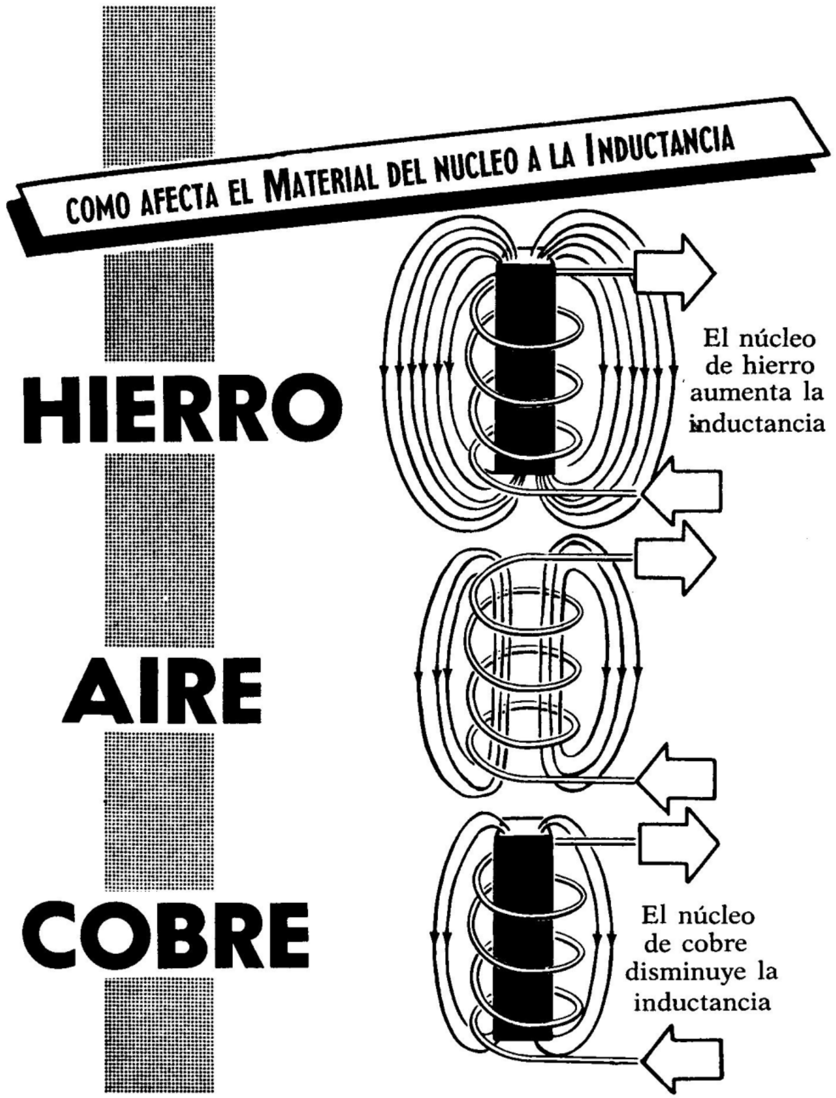
Las bobinas insertadas en los circuitos para aumentar la inductancia de éstos se llaman «inductancias» o «bobinas de choque».



Factores que afectan a la inductancia *(continuación)*

Los factores que afectan a la intensidad del campo magnético pueden afectar también a la inductancia de un circuito. Por ejemplo, un núcleo de hierro introducido en una bobina aumenta la inductancia a causa de que concentra y aumenta el número de líneas magnéticas de fuerza próximas a la bobina. Por consiguiente el número de líneas de fuerza que pueden expandirse y contraerse cuando varía la intensidad de la corriente, es ahora mayor que antes de introducir el núcleo de hierro.

Un núcleo de cobre tiene el efecto contrario, pero en menor grado.



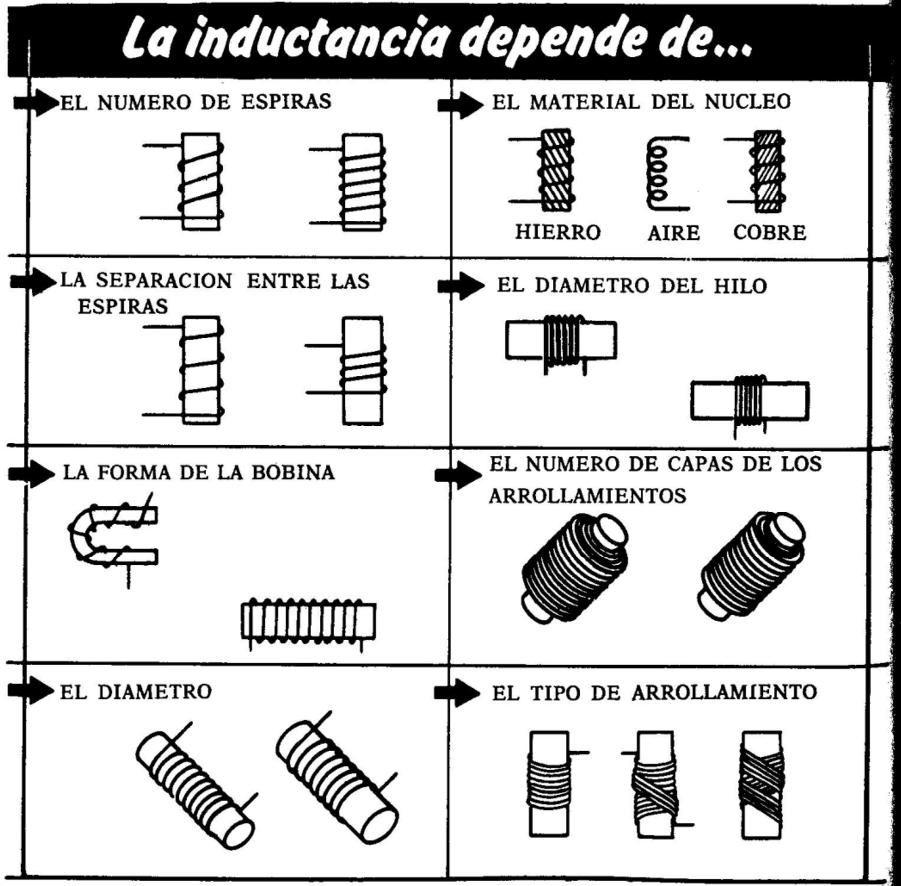
Unidades de inductancia

La unidad básica de medida para la inductancia es el henrio. Para cantidades de inductancia menores que un henrio, se emplean el milihenrio y el microhenrio. No se utiliza una unidad mayor que el henrio porque las inductancias son normalmente de un valor que puede ser cómodamente expresado en henrios o en fracciones de henrio.

Un circuito tiene una inductancia de un henrio cuando la fuerza contraelectromotriz inducida en él es un voltio si la intensidad de la corriente varía a razón de un amperio por segundo.

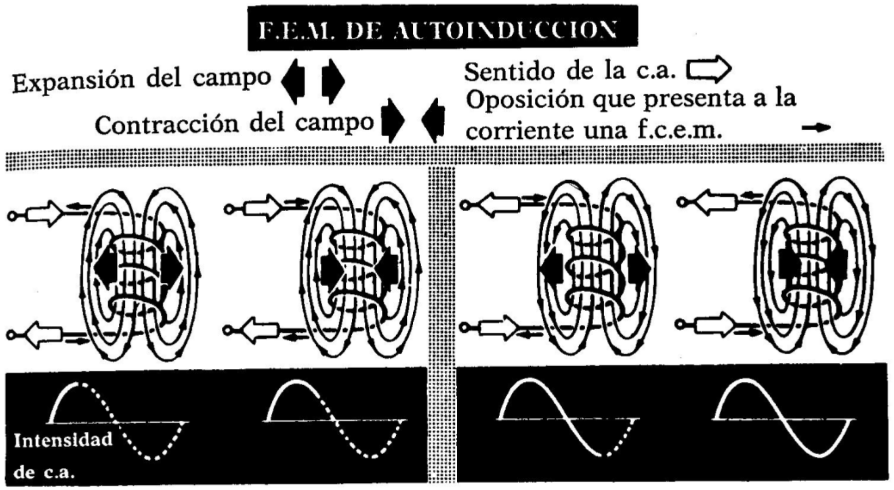
La inductancia únicamente se puede medir con instrumentos especiales y depende por completo de la construcción física del circuito. Alguno de los factores más importantes que determinan el valor de la inductancia de una bobina son el número de espiras, el espacio entre ellas, el diámetro de la bobina, la clase de material que hay alrededor y dentro de la bobina, el diámetro del hilo, el número de capas de hilo, el tipo de devanado o arrollamiento de la bobina y la forma de conjunto de ésta. El diámetro del hilo no afecta directamente a la inductancia, pero determina el número de espiras que se puede devanar en un espacio dado.

Todos estos factores son variables y no es posible utilizar ninguna fórmula sencilla y única para hallar la inductancia. Bobinas de diferente construcción pueden tener una inductancia de un henrio, y cada una de ellas producirá el mismo efecto en un circuito.



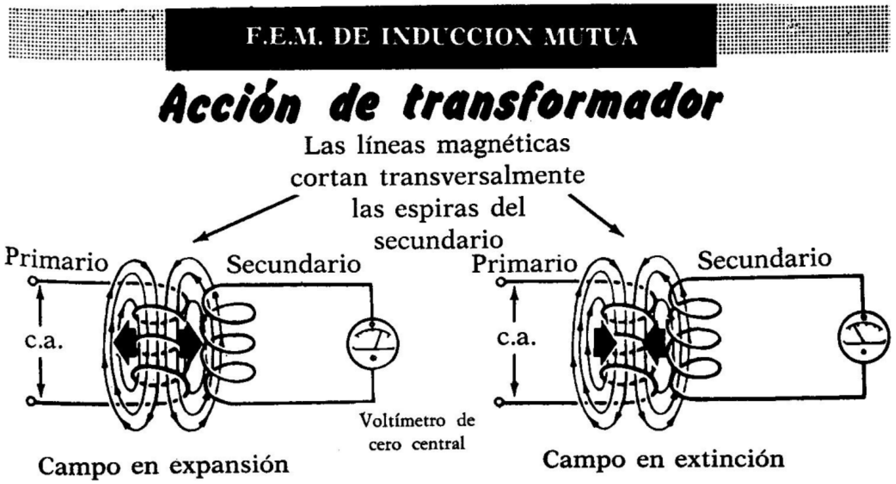
Cómo funciona un transformador

Cuando pasa una corriente alterna por una bobina, se genera alrededor de ésta un campo magnético alterno. Este campo se expande desde el centro de la bobina y se contrae hacia dicho centro cuando la c.a. que recorre la bobina varía desde 0 hasta un máximo y vuelve nuevamente a cero. Como el campo magnético alterno corta transversalmente las espiras de la bobina, se induce una f.e.m. de autoinducción en ella, f.e.m. que se opone a las variaciones de la intensidad de corriente.



Si el campo magnético alterno generado por una bobina, corta transversalmente las espiras de una segunda bobina, se generará una f.e.m. en esta segunda bobina, lo mismo que se induce una f.e.m. en una bobina cuando es cortada por su propio campo magnético. La f.e.m. generada en la segunda bobina se llama «f.e.m. de inducción mutua» y la acción por la cual se genera esta tensión se llama «acción de transformador».

En la acción de transformador se transfiere energía eléctrica desde una bobina (primario) a otra (secundario) por medio de un campo magnético variable.

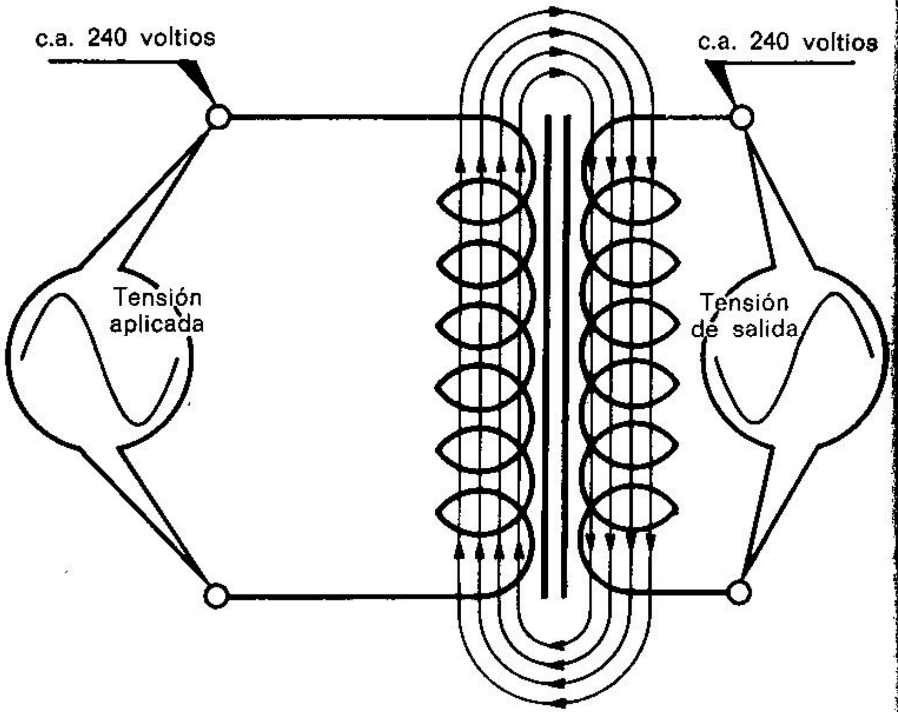


Cómo funciona un transformador *(continuación)*

Un transformador simple se compone de dos bobinas muy próximas entre sí, pero eléctricamente aisladas una de otra. La bobina a la cual se aplica la c.a. se llama «devanado primario» o simplemente «primario». Genera un campo magnético que corta transversalmente a las espiras de la otra bobina, llamada «secundario» y genera en ella una f.e.m. Así, un transformador transfiere potencia eléctrica de una a otra bobina por medio de un campo magnético alterno.

Recuerde que las dos bobinas de un transformador no están conectadas eléctricamente entre sí, sino que están acopladas magnéticamente. Suponga que sean idénticas las bobinas del primario y del secundario y que estén colocadas de modo que todas las líneas de fuerza del campo magnético variable creado por el paso de una c.a. en el primario cortan a todas las espiras de ambas bobinas. Si la bobina del secundario no está conectada a un circuito exterior, la f.c.e.m. inducida en el primario será de magnitud casi igual a la tensión aplicada, pero de fase opuesta. Por el primario sólo pasará una corriente de muy poca intensidad, debida a la ligera diferencia entre la tensión aplicada y la fuerza contraelectromotriz. A esta corriente se la denomina corriente magnetizante.

La bobina del secundario es idéntica a la del primario, y está cortada por las mismas líneas de fuerza que cortan al primario. También es inducida una f.e.m. en el secundario, y esta f.e.m. es de igual magnitud y de la misma fase que la fuerza contraelectromotriz inducida en el primario, es decir, es casi de la misma magnitud que la tensión aplicada al primario y de fase opuesta.



Cómo funciona un transformador *(continuación)*

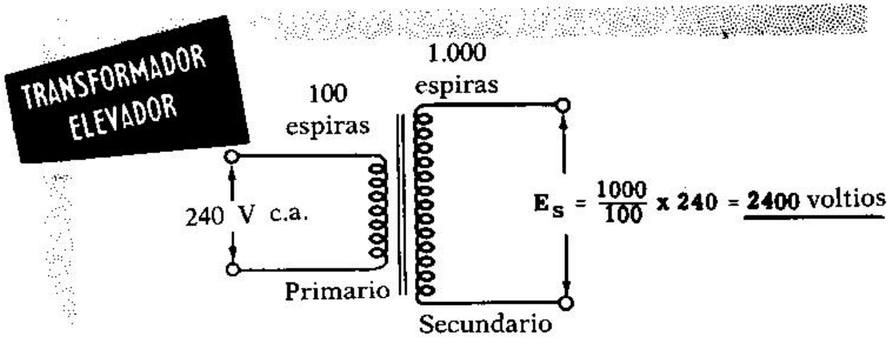
Los transformadores se utilizan a menudo como medio de «elevar» y «rebajar» las tensiones de c.a. Estos efectos se obtienen utilizando bobinas de diferentes números de espiras.

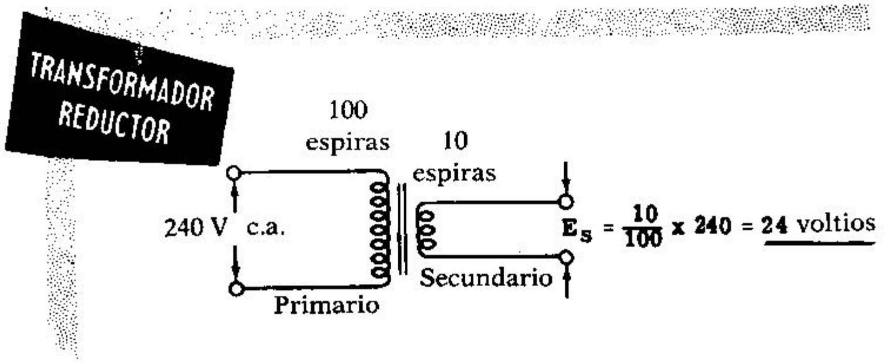
En la página 3.46 ha aprendido que uno de los factores que afecta a la inductancia es el número de espiras de una bobina. Si este número aumenta, aumenta también la inductancia y por consiguiente la f.e.m. inducida. En consecuencia, si sustituye Vd. el secundario del transformador descrito en la página anterior por una bobina que tenga doble número de espiras, la f.e.m. inducida se duplicará.

Recíprocamente, se puede obtener una reducción de la f.e.m. inducida en el secundario, sustituyendo la bobina por otra de menor número de espiras.

Suponiendo que todas las líneas magnéticas de fuerza del primario cortan transversalmente a todas las espiras del secundario, la tensión inducida en éste dependerá de la relación entre el número de espiras del secundario y el número de espiras del primario. Por ejemplo, si hay mil espiras en el secundario y sólo 100 en el primario, la tensión inducida en el secundario será 10 veces mayor que la tensión aplicada al primario (1.000/100 = 10). Como hay más espiras en el secundario que en el primario, a este tipo de transformador se le llama «elevador».

En cambio, si el secundario tiene 10 espiras y el primario tiene 100 espiras, la tensión inducida en el secundario será la décima parte de la tensión aplicada al primario (10/100 = 1/10). Como hay menor número de espiras en el secundario que en el primario, a este tipo de transformador se le llama «reductor».





Cómo funciona un transformador *(continuación)*

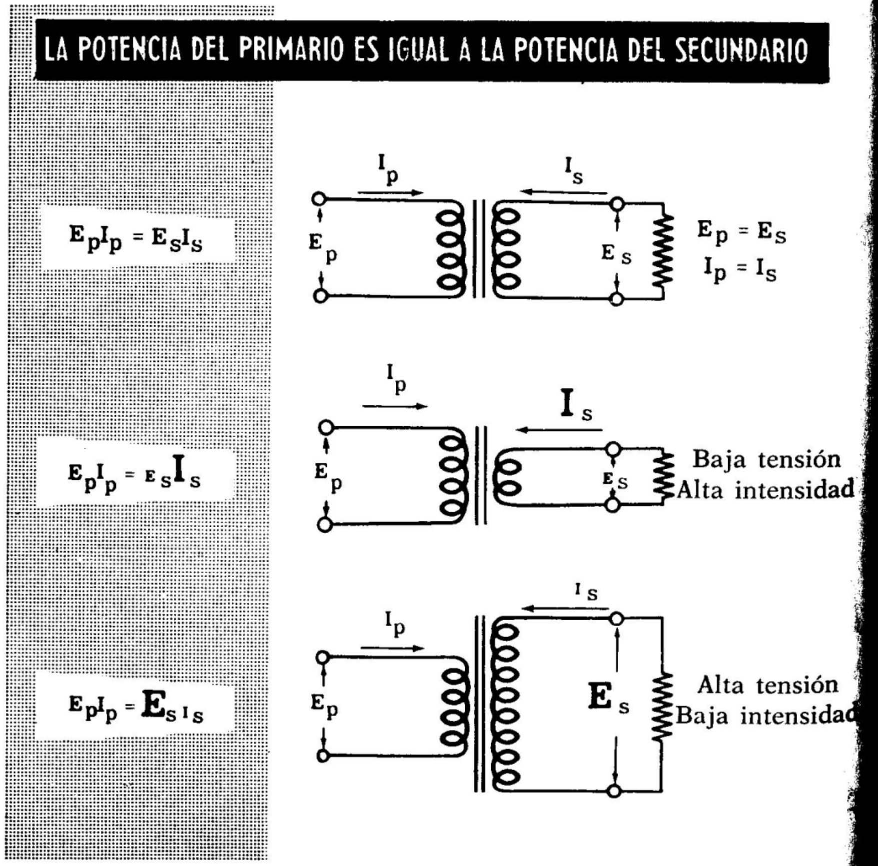
Un transformador no genera potencia eléctrica. Simplemente transfiere la potencia eléctrica de una a otra bobina por inducción magnética. Aunque los transformadores no tienen un rendimiento del 100 × 100, se aproximan mucho a ello. Por consiguiente, puede definirse un transformador como un dispositivo que transfiere potencia desde su circuito primario hasta el circuito secundario sin pérdida (suponiendo un rendimiento ideal del 100 × 100).

Como la potencia es igual a la tensión multiplicada por la intensidad, si E_pI_p representa la potencia del primario y E_sI_s representa la potencia del secundario, se tiene $E_pI_p = E_sI_s$. Si las tensiones del primario y del secundario son iguales, las corrientes del primario y del secundario deben ser también iguales.

Suponga que E_p es doble que E_s. Entonces, para que E_pI_p sea igual a E_sI_s, I_p debe ser la mitad de I_s. De esto se deduce que un transformador que reduzca la tensión, debe elevar la intensidad de la corriente.

Análogamente, si E_p es sólo la mitad de E_s, I_p debe ser el doble de I_s. Así, un transformador que eleva la tensión, reduce la intensidad.

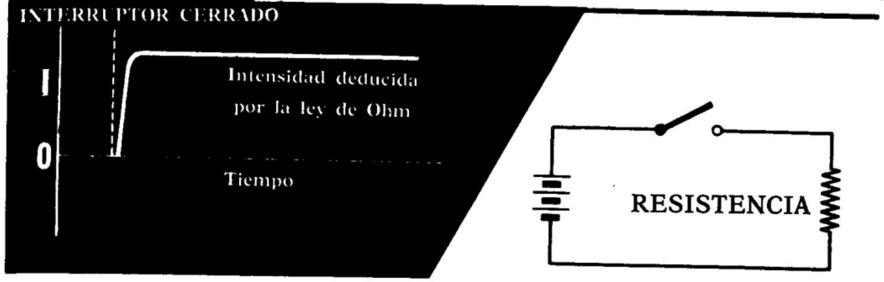
Los transformadores se clasifican en «reductores» y «elevadores» en cuanto a la tensión.



Constante de tiempo inductiva de un circuito de c.c.

En un circuito consistente en una batería, un interruptor y un resistor conectados en serie, la corriente alcanza su intensidad máxima rápidamente cuando se cierra el interruptor. Realmente no puede cambiar desde cero hasta su valor máximo instantáneamente, pero el tiempo transcurrido es tan corto que se puede considerar instantáneo dicho cambio.

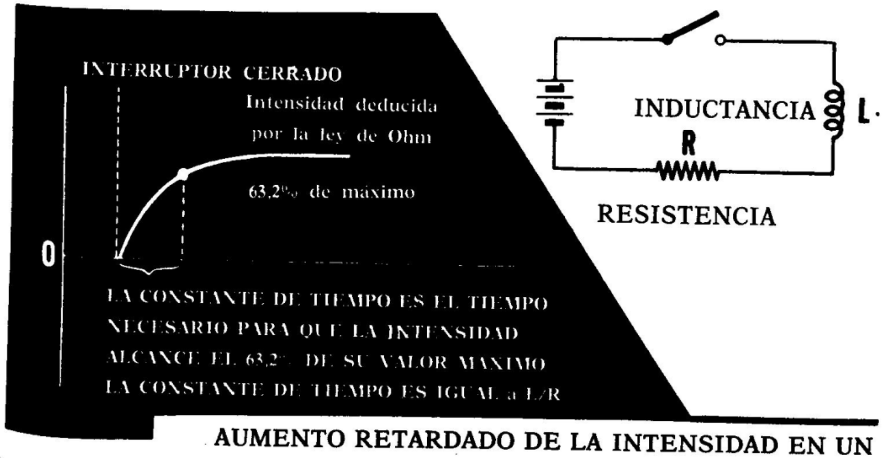
AUMENTO DE LA INTENSIDAD EN UN CIRCUITO CON RESISTENCIA



Si se conecta una bobina en serie con el resistor, la intensidad de la corriente no alcanza su valor máximo instantáneamente, si no que al principio aumenta rápidamente y luego más lentamente a medida que se aproxima a su valor máximo. Para todos los circuitos inductivos la forma de la curva que representa este fenómeno, es fundamentalmente la misma, aunque el tiempo necesario para alcanzar el valor máximo varía en cada caso.

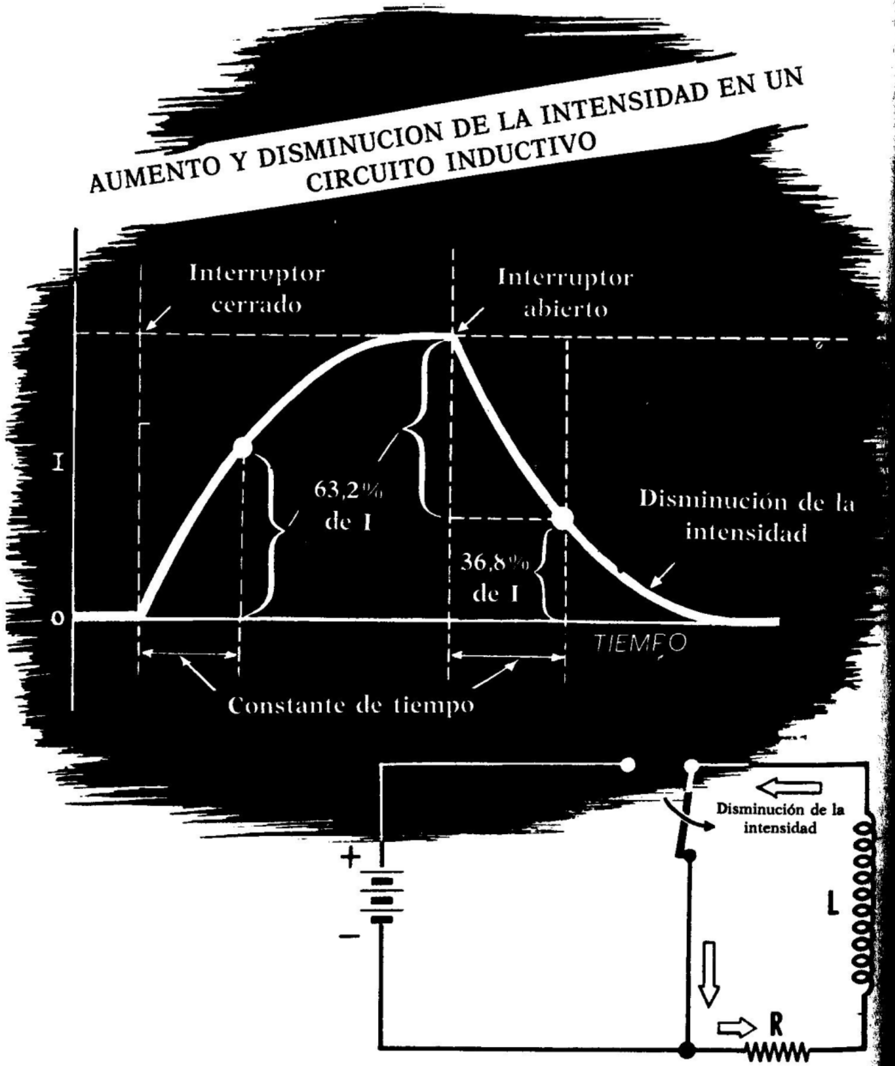
El tiempo necesario para que la intensidad alcance su valor máximo está determinado por la relación entre la inductancia del circuito y su resistencia en ohmios. Esta relación o cociente L/R —inductancia (en henrios) dividido por la resistencia (en ohmios)— se llama «constante de tiempo» del circuito inductivo, y expresa el tiempo (en segundos) necesario para que la corriente aumente en el circuito hasta alcanzar el 63,2 por ciento de su valor máximo.

Este aumento retardado de la intensidad de corriente de un circuito es debido a la «autoinducción» y se aprovecha en muchos circuitos prácticos, tales como los de relés de retardo de tiempo y circuitos de arranque.



AUMENTO RETARDADO DE LA INTENSIDAD EN UN CIRCUITO CON INDUCTANCIA

Constante de tiempo inductiva de un circuito de c.c. *(continuación)*



Si se cortocircuitan los terminales de la bobina en el mismo instante en que se abre el interruptor, por la bobina continúa circulando la corriente a causa de la acción del campo magnético al extinguirse. La corriente disminuye de la misma manera que aumentó, rápidamente al principio y con lentitud al final, tal como muestran las curvas de la figura.

También se puede utilizar la «constante de tiempo» para determinar el instante en que ha disminuido la corriente en el 63,2 por ciento, o ha alcanzado el 36,8 por ciento de su máximo valor original.

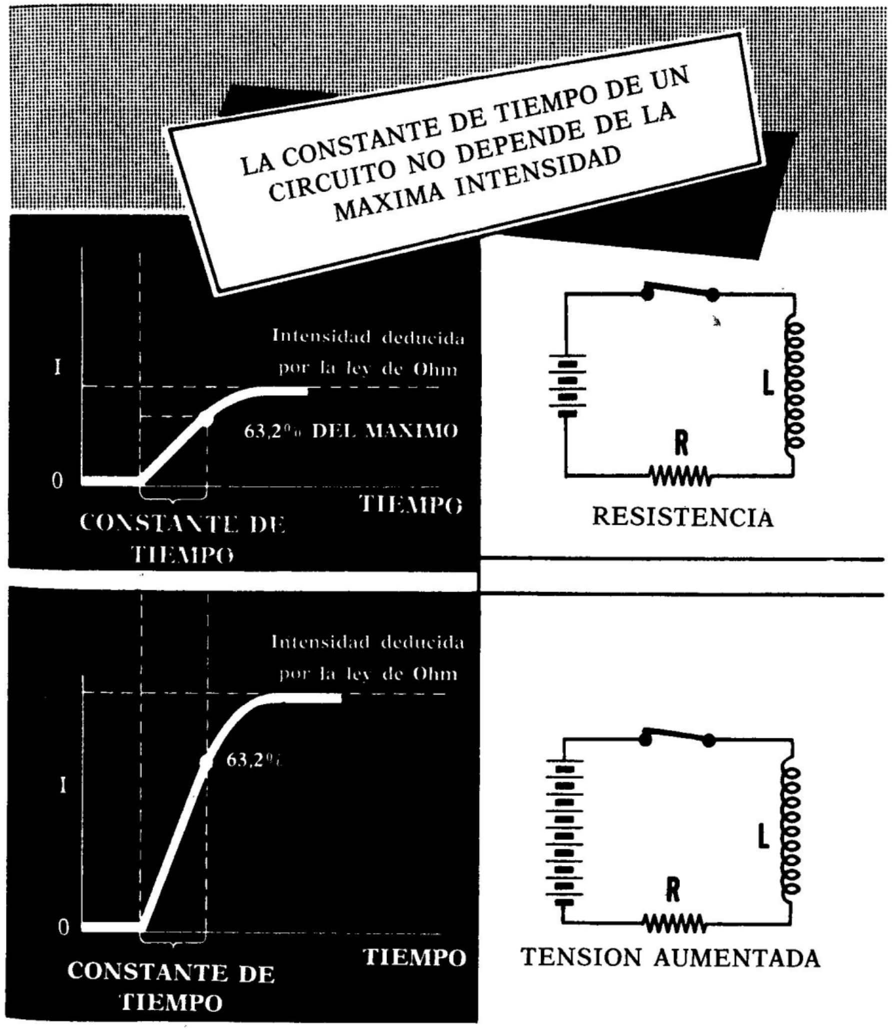
En los circuitos inductivos, cuanto menor es la resistencia, mayor es la constante de tiempo para el mismo valor de inductancia.

Constante de tiempo inductiva de un circuito de c.c. *(continuación)*

La constante de tiempo de un circuito inductivo dado es siempre la misma, tanto para el aumento como para la disminución de la intensidad. Si se varía la tensión aplicada al circuito, variará el valor máximo que alcanzará la intensidad, pero no por ello variará el tiempo que tarde en alcanzar dicho valor al cerrar el interruptor, lo que se traducirá en un aumento más o menos rápido, según el caso, para alcanzar el valor máximo de la intensidad en un mismo tiempo.

Así, si se utiliza una tensión mayor, el valor máximo alcanzado por la intensidad también será mayor, pero el tiempo necesario para que alcance este valor es el mismo.

Todo circuito inductivo tiene resistencia, puesto que el hilo utilizado en una bobina siempre tiene alguna. Por esto no es posible una inductancia perfecta, es decir, una bobina sin resistencia.



Reactancia inductiva

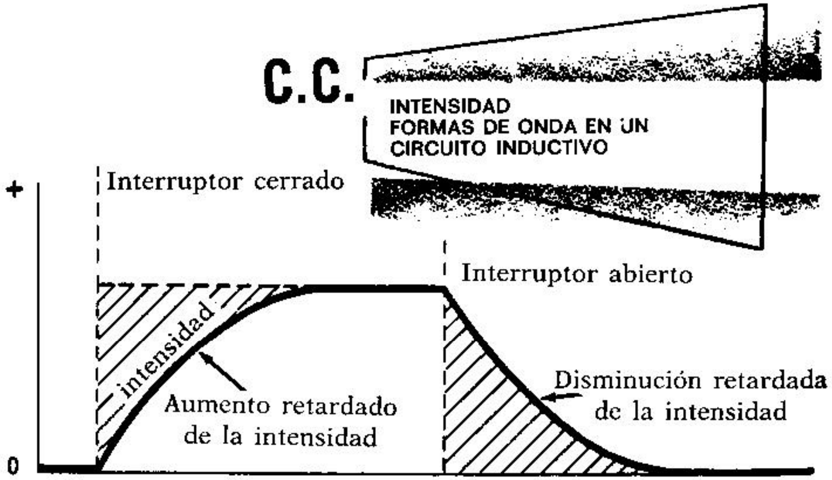
Reactancia inductiva es la oposición a la corriente que presenta la inductancia de un circuito.

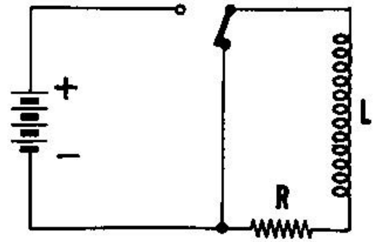
Ya sabe que la inductancia sólo afecta a la intensidad de la corriente mientras ésta varíe, ya que es la variación de intensidad la que genera una f.e.m. Con corriente continua el efecto de la inductancia sólo es apreciable cuando la corriente se establece o se interrumpe, pero con corriente alterna (que cambia continuamente) se genera una f.e.m. inducida constantemente.

Considere ahora el efecto de un circuito inductivo dado sobre las formas de onda de c.c. y de c.a. La constante de tiempo del circuito es siempre la misma, y está determinada únicamente por los valores de la resistencia y de la inductancia del circuito.

Para la c.c. las formas de onda de la corriente serán como las abajo representadas. Al principio de la forma de onda de corriente, hay una superficie sombreada entre el valor máximo y la curva, lo cual demuestra que la inductancia se opone a la variación de la corriente cuando se crea el campo magnético. En el otro extremo de la curva de corriente existe otra superficie análoga, la cual demuestra que la corriente continúa después de que se anula la tensión, a causa de la desaparición o extinción del campo.

Estas superficies sombreadas son de la misma área, lo que demuestra que la energía que se consume en la creación del campo magnético es devuelta al circuito cuando el campo desaparece.

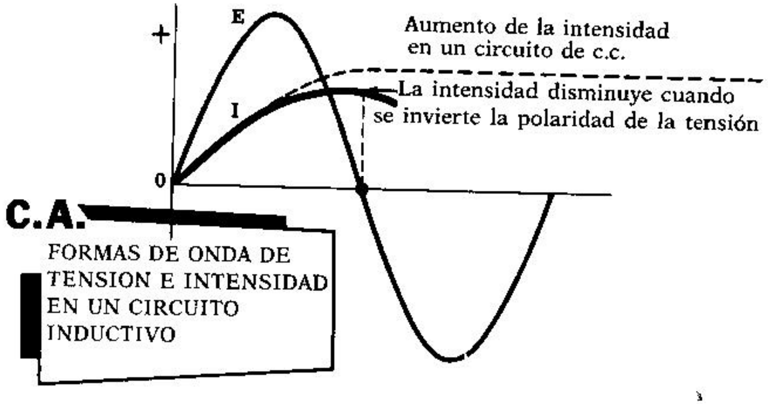




Reactancia inductiva *(continuación)*

Si el mismo circuito inductivo fuese recorrido por c.a. en lugar de c.c., la forma de onda de la c.a. durante su primer semiciclo quedaría afectada de la manera abajo representada. Cuando se cierra el interruptor, la intensidad aumenta con la tensión, pero hay un retraso en el aumento a causa de la inductancia del circuito. Este retraso impide que la intensidad logre alcanzar el valor máximo que le corresponde según el valor de la tensión máxima o de cresta, como ocurría en c.c., ya que antes de que llegue a dicho valor, la polaridad de la tensión de c.a. se invierte.

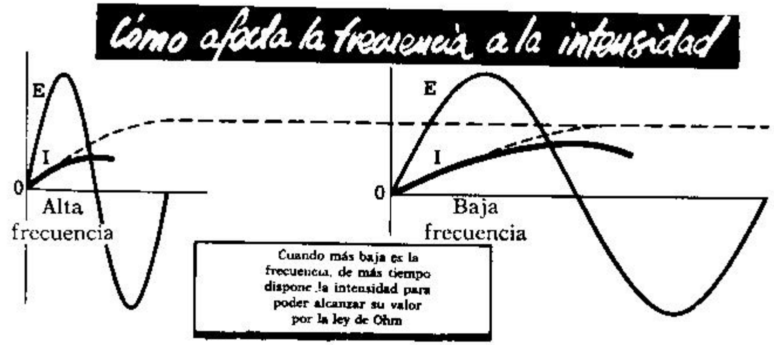
De esto se deduce que, en un circuito que posea inductancia, una tensión de c.c. producirá mayor intensidad de corriente que una tensión equivalente de c.a.



Si la frecuencia de la c.a. aplicada es baja, la intensidad tendrá más tiempo para alcanzar un valor más alto antes de que se invierta la polaridad de la tensión que si la frecuencia fuese alta. Así, cuanto más alta es la frecuencia, menor será la intensidad de corriente en un circuito inductivo.

La reactancia inductiva es la oposición que presenta una inductancia a una corriente. Dicha oposición no sólo depende de la inductancia, si no también de la frecuencia. La fórmula que se emplea para hallar la reactancia inductiva es $X_L = 2\pi fL$, siendo f la frecuencia expresada en ciclos por segundo o hertzios, L la inductancia en henrios, y π un número constante (3,14).

Como X_L representa la oposición a la corriente, la unidad que se emplea para medirla es el ohmio.



Los diagramas de arriba muestran sólo la dependencia entre la tensión y la intensidad inmediatamente después de cerrado el interruptor, es decir, durante el primer ciclo de la tensión de c.a. aplicada.

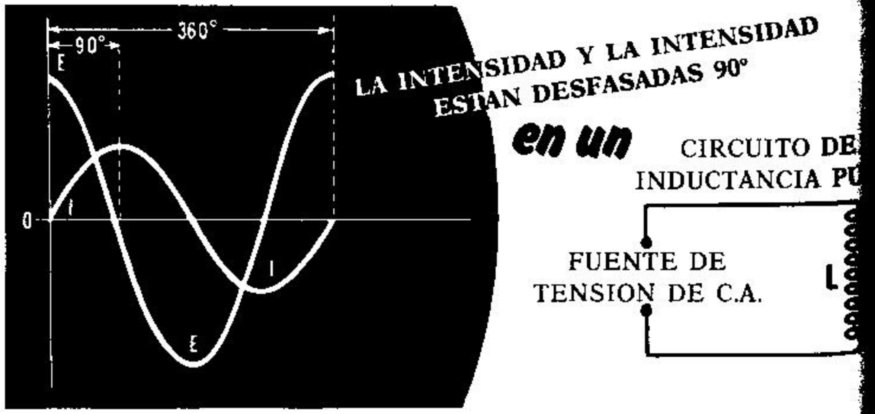
Reactancia inductiva *(continuación)*

Si un circuito de c.a tiene sólo resistencia pura, la intensidad aumenta y disminu exactamente al mismo tiempo que lo hace la tensión, y se dice que las dos ondas est en fase.

Si un circuito de c.a. contiene sólo inductancia pura, la corriente no aumenta disminuye al mismo tiempo que lo hace la tensión. En vez de esto, alcanza su valor m ximo un cuarto de ciclo después que lo hace la tensión, manteniéndose un cuarto ciclo retrasada en todos los puntos del ciclo.

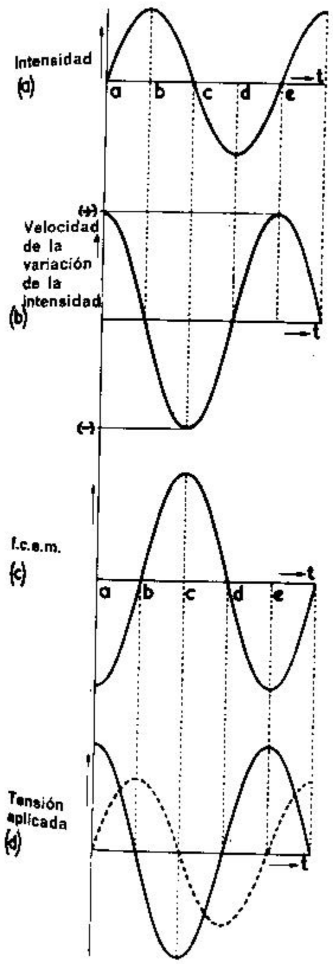
Dicho de otro modo, la corriente y la tensión están «desfasadas» un ángulo de 9 y se dice que la intensidad está «retardada» 90° con respecto a la tensión.

Como en la práctica todos los circuitos contienen resistencia, la corriente nu está retardada con respecto a la tensión tanto como 90°, si no un ángulo menor cu valor depende de la relación entre el valor de la inductancia del circuito y el de la re tencia de éste.



Reactancia inductiva *(continuación)*

Ahora veamos cómo se retrasa la intensidad con respecto a la tensión aplicada si suponemos que la inductancia *(L)* de la figura de la página anterior no tiene resistencia, y consideramos el efecto producido por la corriente alterna al pasar por ella.



Para ello, primero se dibuja la forma de onda de la intensidad de la corriente que pasa por la bobina, curva (a). Sabemos que esta corriente alterna induce una fuerza contraelectromotriz en la bobina, cuyo valor es mayor cuando la intensidad varía más rápidamente y menor cuando varía lentamente. Si dibujamos un gráfico representativo de la velocidad de variación de la intensidad podemos ver cuándo es mayor la f.e.m y cuando es menor.

Si Vd. examina la forma de onda de la intensidad (a) puede ver que en el punto «a» varía muy rápidamente en sentido creciente. En el punto «b» varía lentamente y empieza a disminuir. En el punto «c» la corriente vuelve a variar muy rápidamente, pero en sentido decreciente, pasando a ser negativa. Observando así las variaciones de velocidad de la corriente en la curva (a) puede dibujar una curva que represente la velocidad de variación, curva (b).

Ya sabe que la f.e.m. inducida por la corriente alterna es máxima cuando la velocidad de variación de la corriente es máxima, y que es de tal polaridad que siempre se opone a la variación de la corriente. Por consiguiente, de la curva (b) se puede deducir la forma de onda de la f.c.e.m., y ésta está dibujada en (c).

Es evidente que, para que pase corriente, esta f.c.e.m. debe ser menor que la f.e.m. aplicada. Se deduce, pues, que la f.e.m. aplicada debe ser siempre de fase opuesta a la f.c.e.m. y de una magnitud algo mayor.

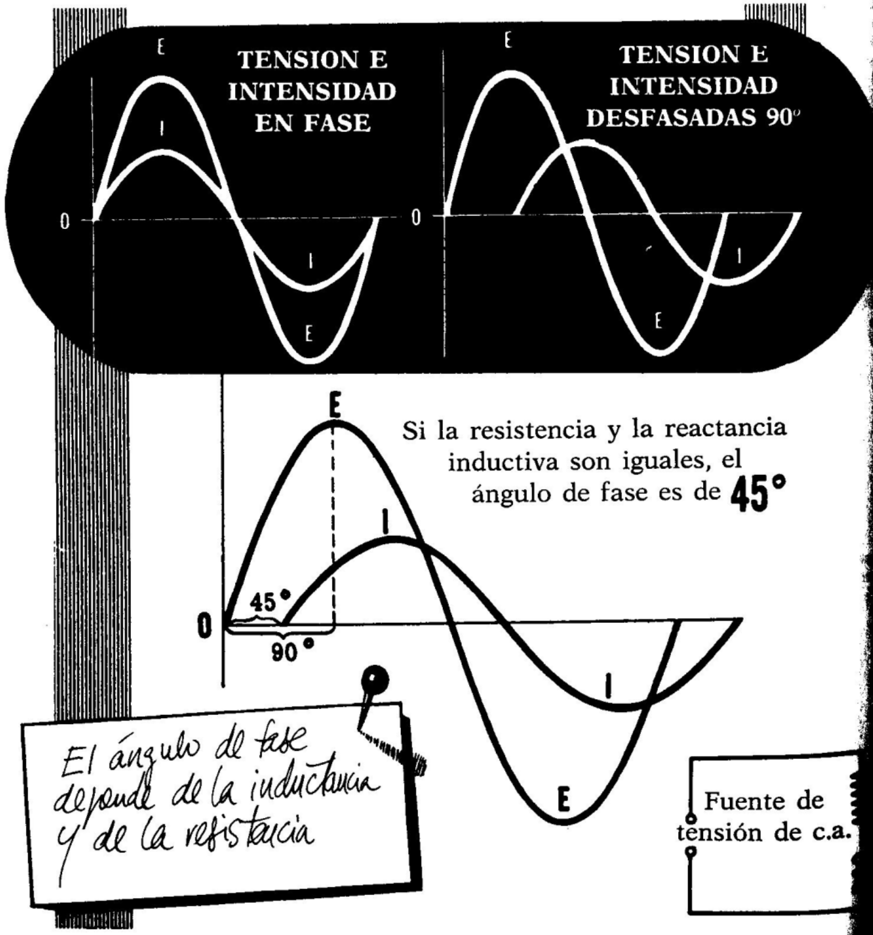
La forma de onda de la f.e.m. aplicada está dibujada en la curva (d) y la forma de onda de la intensidad está representada en línea de trazos para la comparación de ambas. Verá que la corriente alcanza su máximo 90° más tarde que la tensión, es decir, está retardada 90° con respecto a ésta.

Reactancia inductiva *(continuación)*

En un circuito que contiene reactancia inductiva y resistencia, la corriente alterna se retrasará con respecto a la tensión en una cantidad angular comprendida entre cero grados y 90° o, dicho de otra manera, su retardo será menor de 90°, pero tampoco estará «en fase» con la tensión. El valor exacto del retardo depende de la relación entre los valores de la resistencia y de la inductancia del circuito. Cuanto mayor es la resistencia con respecto a la inductancia, menor será el «desfase» entre la tensión y la intensidad, y cuanto menor es la resistencia comparada con la inductancia, más se aproximará el desfase a un cuarto de ciclo (90°). A este retardo angular de la intensidad se le llama «ángulo de fase».

El ángulo de fase se puede calcular por la fórmula: $tg\ \phi = X_L/R$, siendo ϕ el ángulo de fase.

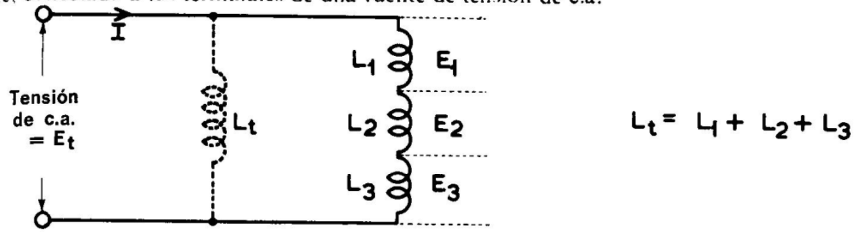
Si el ángulo de retardo entre la tensión y la corriente es de 45°, se dice que la onda de corriente está retrasada 45° con respecto a la onda de tensión. Como este es el valor medio entre cero grados (ángulo de fase de un circuito resistivo puro) y 90° (ángulo de fase de un circuito inductivo puro), la resistencia y la reactancia inductiva deben ser iguales, produciendo cada una de ellas el mismo efecto sobre el valor de la intensidad de la corriente.



Inductancias en serie y en paralelo

En la parte 2 aprendió Vd. a calcular la resistencia total en circuitos serie y paralelo. La inductancia total en los circuitos serie y paralelo se puede hallar aplicando las mismas reglas.

Sea un circuito serie formado por tres bobinas (con resistencia despreciable) en serie, conectado a los terminales de una fuente de tensión de c.a.



La corriente I del circuito pasa por cada una de las bobinas, y la tensión total es $E_t = E_1 + E_2 + E_3$.

Podemos aplicar la ley de Ohm a un circuito de c.a. sustituyendo la resistencia (R) por la reactancia (X). Así, $E_t = IX_t$, $E_1 = IX_1$, $E_2 = IX_2$ y $E_3 = IX_3$.

Por tanto $$IX_t = IX_1 + IX_2 + IX_3.$$

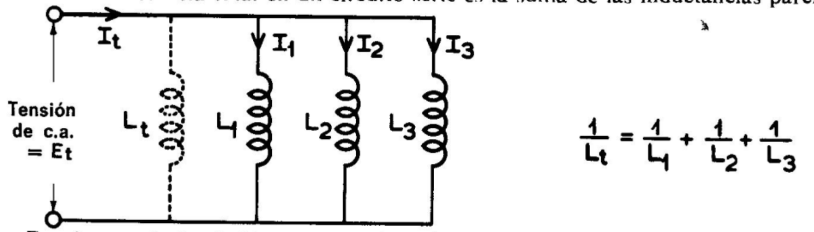
Sustituyendo en esta ecuación X_t, X_1, X_2 y X_3 por sus valores en función de la frecuencia y la inductancia se tiene:

$$I\ (2\pi f L_t) = I\ (2\pi f L_1) + I\ (2\pi f L_2) + I\ (2\pi f L_3) \text{ ó } (2\pi f I)L_t = 2\pi f I\ (L_1 + L_2 + L_3).$$

Como $2\pi f I$ está en los dos miembros de la ecuación, simplificando:

$$L_t = L_1 + L_2 + L_3$$

Así la inductancia total en un circuito serie es la suma de las inductancias parciales.



En el caso de las bobinas con resistencia despreciable en un circuito paralelo, la tensión entre los extremos de cada bobina es la misma, y la corriente total se reparte en las diversas ramas. (La intensidad real de la corriente en cada rama, depende, naturalmente, de la oposición que la inductancia de cada rama ofrece a la c.a.).

Se tiene pues: $I_t = I_1 + I_2 + I_3$.

Aplique ahora la ley de Ohm a este circuito, sustituyendo la resistencia (R) por la reactancia (X):

$$I_t = E/X_t,\ I_1 = E/X_1,\ I_2 = E/X_2 \text{ e } I_3 = E/X_3.$$

La intensidad total de la corriente total vendrá dada por:

$$\frac{E}{X_t} = \frac{E}{X_1} + \frac{E}{X_2} + \frac{E}{X_3} \quad \text{ó} \quad \frac{E}{2\pi f L_t} = \frac{E}{2\pi f L_1} + \frac{E}{2\pi f L_2} + \frac{E}{2\pi f L_3}$$

Esto se puede expresar más cómodamente así:

$$\frac{E}{2\pi f} \times \frac{1}{L_t} = \frac{E}{2\pi f}\left[\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}\right]$$

y como $E/2\pi f$ está en los dos miembros de la ecuación, se tiene:

$$\frac{1}{L_t} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$

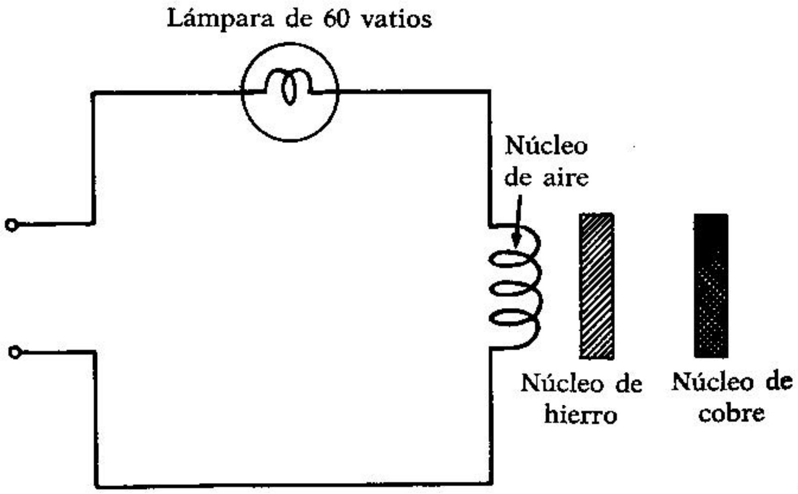
Por tanto, la inversa de la inductancia total en un circuito paralelo es igual a la suma de las inversas de las inductancias.

EXPERIMENTO — Efecto del material del núcleo sobre una bobina

Conecte una bobina formada solamente por las espiras de cobre, (bobina con núcleo de aire) en serie con una lámpara de 60 vatios a una red de c.a. de 220 voltios, según indica la figura, y observe el brillo de la lámpara.

Habiendo corriente en el circuito, inserte cuidadosamente un núcleo de hierro dentro de la bobina. Observe que disminuye el brillo de la lámpara a consecuencia de haber aumentado la inductancia de la bobina, y por lo tanto la caída de tensión en ella, por lo que la tensión en bornes de la lámpara habrá disminuido.

Luego saque el núcleo de hierro e introduzca un núcleo de cobre. Observe el aumento del brillo de la lámpara, consecuencia de la disminución de inductancia de la bobina. El efecto del cobre es debilitar el campo magnético de la bobina, disminuyendo así su inductancia. Ahora la tensión en bornes de la lámpara habrá aumentado al disminuir la caída de tensión en la bobina, por lo que la lámpara brillará más.



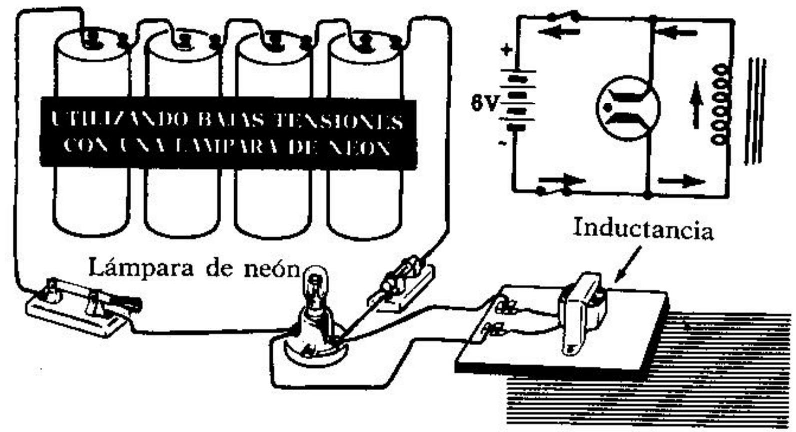
COMO VARIA LA INDUCTANCIA CON EL MATERIAL DE NUCLEO

EXPERIMENTO — Generación de f.e.m. inducida

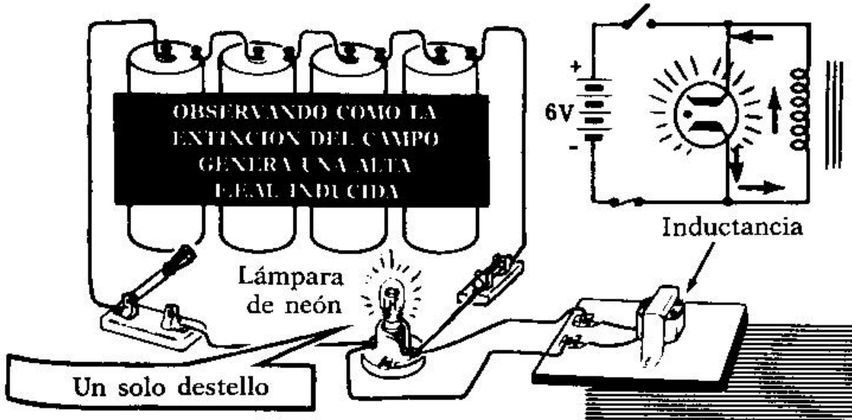
Conecte cuatro pilas secas en serie formando una batería de 6 voltios con un portalámpara conectado entre sus terminales y a través de un fusible y un interruptor. Inserte una lámpara de neón en el portalámpara y conecte una bobina entre los terminales de la lámpara.

La lámpara de neón no brillará hasta que la tensión que se le aplica alcance un determinado valor llamado «tensión de cebado», que en este caso es 70 voltios.

Cuando cierre el interruptor, verá que la lámpara no se enciende. Confirme con un voltímetro de c.c. de 0-10 voltios que la tensión de la batería es ciertamente 6 voltios. Si es así, ya sabe que esta tensión de 6 voltios es menor que la tensión de cebado de la lámpara y que será necesario algún medio de obtener una tensión más alta para que la lámpara se encienda.



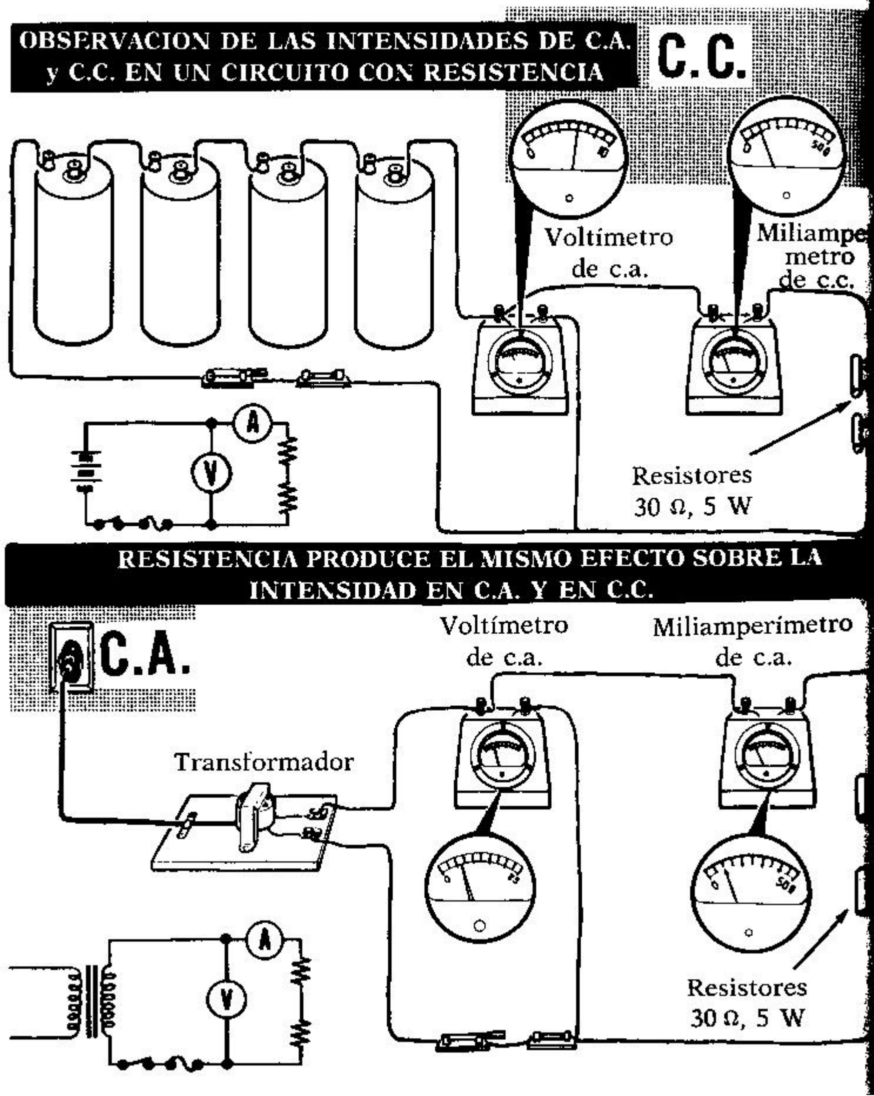
Si ahora abre el interruptor, verá que la lámpara se enciende produciendo destellos, lo que indica que la tensión aplicada entre los terminales de la lámpara y la bobina en paralelo es más alta que la tensión necesaria de cebado. Esta tensión es la f.e.m. inducida, la cual se genera por la extinción del campo magnético de la bobina, proporcionando este experimento una prueba visible del efecto de la inductancia.



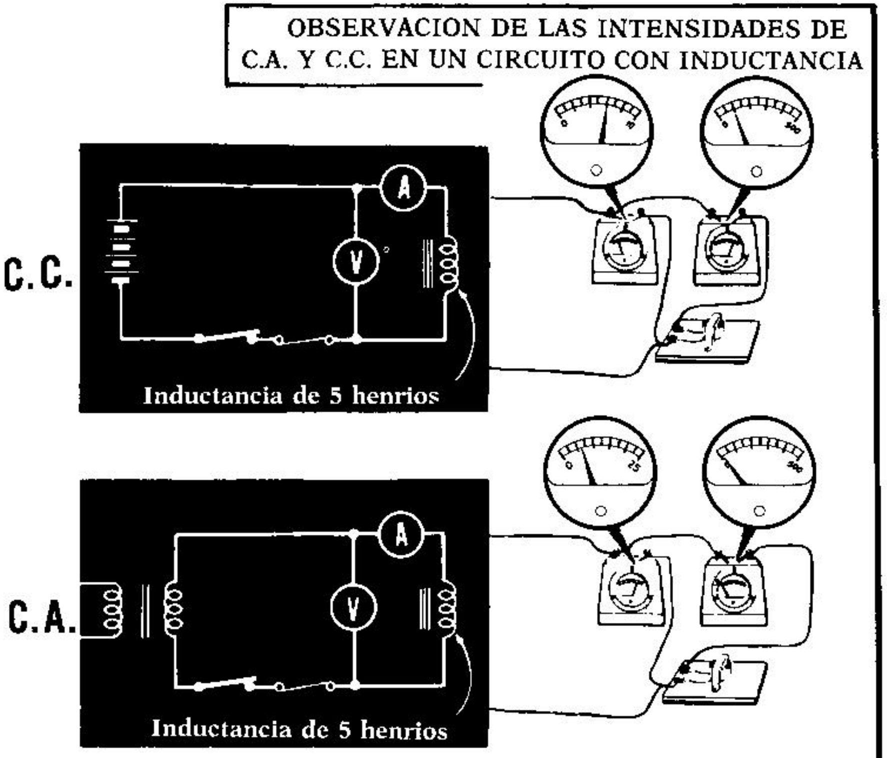
EXPERIMENTO — Intensidad de corriente en los circuitos inductivos

Para comparar el efecto de la inductancia del circuito sobre las intensidades de c.a. y c.c., conecte dos circuitos idénticos, uno en que se utilice una batería de 6 voltios como fuente de tensión de c.c. y el otro en que se utilice un transformador de 6,3 voltios como fuente de tensión de c.a., con el tipo correcto de medidores (c.a. o c.c.) en cada circuito. Primeramente se comparará el efecto de una resistencia de 60 ohmios en uno y otro circuito, empleando miliamperímetros de 0-500 mA de alcance, y voltímetros de 0-10 V de c.c. y 0-25 V de c.a. conectados para medir la intensidad y la tensión. Se utilizan dos resistores de 30 ohmios en serie para obtener cada resistencia.

Observe que las lecturas de intensidad y de tensión son casi las mismas en los dos circuitos.



EXPERIMENTO — Intensidad de corriente en los circuitos inductivos (continuación)



la inductancia se opone al paso de la C.A. más que al de la C.C.

Luego sustituya los dos resistores por bobinas de 5 henrios, 60 ohmios. Al cerrar el interruptor observará que la intensidad de la corriente en el circuito de c.c. es aproximadamente la misma que en el caso anterior de los resistores; pero la intensidad en el circuito de c.a. es mucho menor y no se puede apreciar en el miliamperímetro de c.a. de 0-500 mA de alcance, a causa de que la desviación de la aguja es demasiado pequeña para que se pueda observar.

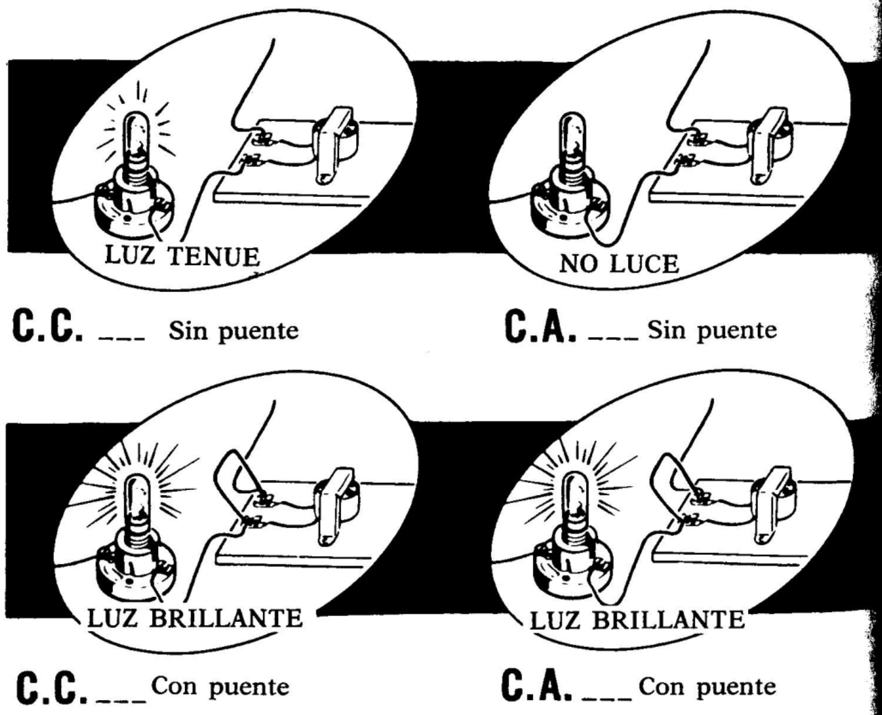
La inductancia de la bobina no produce efecto sobre la c.c. y actúa meramente como una resistencia de 60 ohmios. En cambio, para la c.a. la inductancia es un factor importante, ya que la tensión y la intensidad varían constantemente. El efecto que tiene la reactancia inductiva sobre la c.a. se puede calcular por la fórmula $X_L = 2\pi f L$ ($2\pi = 6,28$, $f = 50$ ciclos por segundo que es la frecuencia de la red y $L = 5$ henrios). Ahora puede hallar la reactancia inductiva, X_L, sustituyendo los símbolos de la fórmula por estos valores y multiplicándolos ($X_L = 6,28 \times 50 \times 5 = 1570\ \Omega$). La reactancia inductiva se expresa en ohmios por oponerse al paso de la c.a., es decir, por actuar como una resistencia.

EXPERIMENTO — Intensidad de corriente en los circuitos inductivos (continuación)

Para confirmar que es realmente la reactancia inductiva lo que reduce la intensida en el circuito de c.a., conecte un portalámpara en serie con la bobina en cada circuit En el caso del circuito de c.c. verá que la lámpara ilumina poco, pero que en el circui de c.a. la intensidad es insuficiente para que se encienda la lámpara.

Empleando trozos cortos de hilo conductor como puentes, conecte entre sí con ell los terminales de las bobinas en cada circuito. En el circuito de c.c. el brillo de la lám para aumenta, demostrando que la resistencia del circuito se ha reducido. En el circuit de c.a. la lámpara brilla casi lo mismo que la del circuito de c.c. Como el brillo de l lámpara varía desde nulo (cuando la lámpara no se enciende) hasta el máximo en e circuito de c.a., se comprueba que la bobina tiene mayor efecto sobre la corriente e el circuito de c.a., que en el de c.c. en el que simplemente se comporta como una resis tencia.

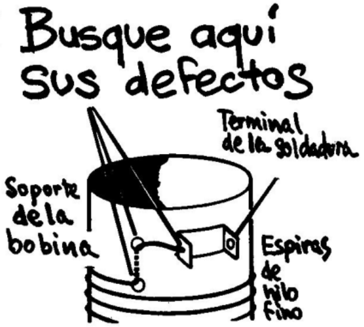
COMO AFECTA LA REACTANCIA INDUCTIVA A LA INTENSIDAD EN UN CIRCUITO



Averías en las bobinas

Ya ha estudiado que las bobinas o «inductancias» se conectan a veces en los circuitos eléctricos para aumentar la inductancia de éstos. En estos componentes se pueden producir averías que impiden el funcionamiento normal del circuito en el que están incluidos. Como las bobinas se construyen de formas y dimensiones muy diferentes, no es posible especificar con precisión cuáles son las averías más probables en ellas. Sin embargo, hay tres defectos que se pueden considerar como probables en una bobina averiada.

Arrollamiento en circuito abierto. Esto puede ser originado por una corriente de excesiva intensidad en la bobina que haya «quemado» el arrollamiento, o puede ser originado por un hilo roto en un terminal de soldadura. Si la bobina es de hilo fino, éste se puede romper en el sitio en que pasa a través del soporte o forma de la bobina.



Un arrollamiento en circuito abierto se puede detectar por inspección visual, o comprobando la continuidad de la bobina con un óhmetro, es decir, midiendo la resistencia del arrollamiento o devanado de la bobina. Si dicha resistencia resulta ser infinita, indica circuito abierto.

Espiras del arrollamiento en cortocircuito

Si dos o más espiras de un arrollamiento de bobina se tocan, a causa de un defecto de aislamiento entre las espiras, la inductancia y la resistencia de la bobina variará. Esta clase de avería se puede detectar comprobando la continuidad con un óhmetro; si la resistencia medida con el óhmetro es más baja que la especificada por los fabricantes, indicará tal defecto.

También se puede sacar la bobina del circuito y sustituirla por otra buena. Si los síntomas observados con la primera bobina sospechosa desaparecen, es que ha sido remediada la avería. Sin embargo, hay riesgo con este método de que la nueva bobina se pueda averiar si la causa de la avería ha sido un defecto de cualquier otra parte del circuito.

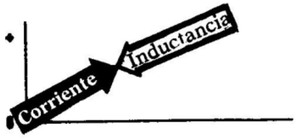
Cortocircuito a tierra

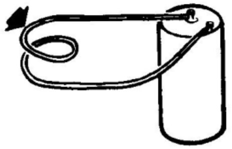
Si es defectuoso el aislamiento entre el arrollamiento de una bobina y su núcleo, el resultado es que la bobina puede quedar conectada a tierra (se supone que la tierra está a potencial cero); ya que generalmente el núcleo de las bobinas se conecta a tierra. Esta clase de defecto se puede detectar comprobando la resistencia entre el arrollamiento de la bobina y el núcleo (o tierra). Un valor nulo o bajo de resistencia indicará aislamiento defectuoso.

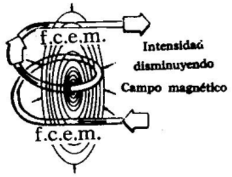
A veces el cortocircuito se puede manifestar solamente cuando la tensión de funcionamiento es aplicada a la bobina, caso en el cual habrá que utilizar un «comprobador de aislamiento». Este tipo de instrumento aplica una tensión elevada (100 ó 500 voltios) al aislamiento cuya resistencia se mide.

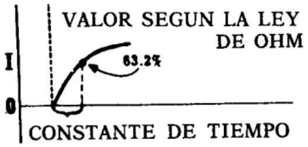
REPASO de la inductancia en circuitos de c.a.

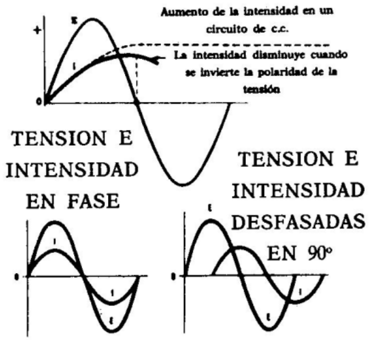
Para repasar lo que ha estudiado de inductancia, lo que es, y cómo afecta a la in tensidad de corriente, recuerde estos hechos acerca de la inductancia y de la reactanci inductiva.

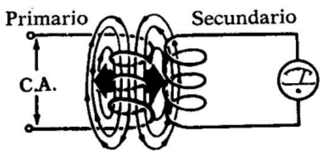












Inductancia. **Propiedad de un circuito que s opone a cualquier variación del sentido o de l intensidad de la corriente; se mide en henrios su símbolo es la letra *L*.**

Bobina o inductancia. **Bobina formada con e piras de hilo conductor, con o sin núcleo de hi rro, utilizada para producir inductancia en un ci cuito.**

F.E.M. inducida. **Tensión que se genera en u circuito por el movimiento del campo magnétic cuando varía la intensidad de la corriente en circuito, y que se opone a dicha variación.**

Constante de tiempo inductiva. **Relación en *L* y *R*, que da el tiempo en segundos necesario pa que la intensidad de corriente en el circuito aume te hasta el 63,2 por ciento de su valor máximo.**

Reactancia inductiva. **Acción de la inductanc oponiéndose a la corriente de c.a. y haciendo q la intensidad se retrase con respecto a la tensió se mide en ohmios y su símbolo es X_L.**

Angulo de fase. **Angulo en grados que la co de corriente se retrasa con respecto a la onda tensión.**

Acción de transformador. **Acción que perm transferir la energía eléctrica desde una bobin otra por medio de un campo magnético alterno. bobina que genera el campo magnético se llam primario, y la bobina en que es inducida la t sión, se llama secundario. La tensión inducida en secundario depende de la relación entre el núm de espiras del secundario y el número de esp del primario.**

§ 5: POTENCIA EN CIRCUITOS INDUCTIVOS

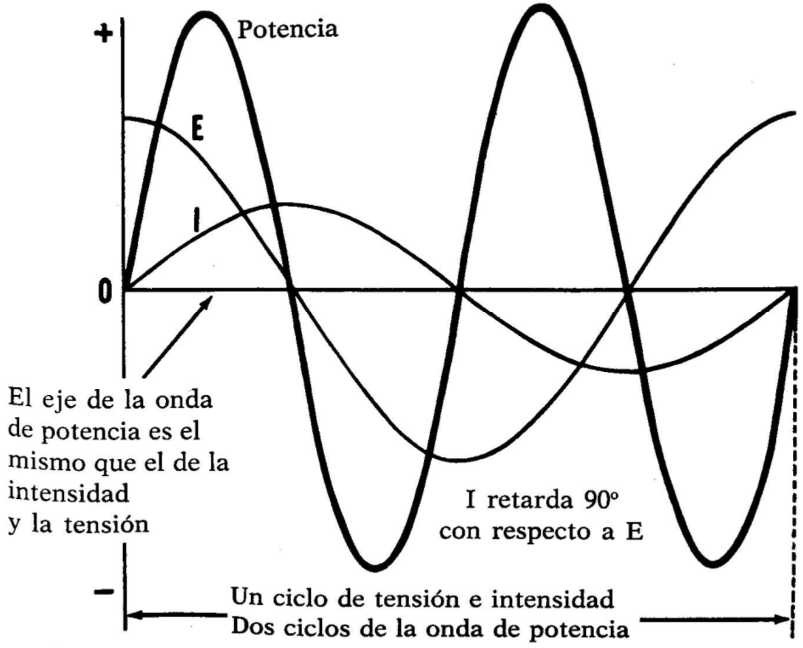
Efecto de la diferencia de fases sobre la onda de potencia

En un circuito teórico que contenga sólo inductancia pura, la corriente se retrasa 90° con respecto a la tensión. Para determinar la onda de potencia de tal circuito se multiplican todos los valores instantáneos correspondientes de la tensión y la intensidad de la corriente para hallar los valores instantáneos de potencia, que luego se representan gráficamente para obtener la curva de potencia.

Vd. ya sabe que la curva de potencia para tensiones e intensidades «en fase» está toda por encima del eje cero, ya que el resultado es positivo cuando se multiplican dos números positivos o dos números negativos. Por el contrario, cuando se multiplica un número negativo por uno positivo, el resultado es un número negativo. Así, cuando se calculan los valores instantáneos de la potencia no estando en fase la intensidad y la tensión, algunos de los valores son negativos.

Si la diferencia de fase es 90°, como ocurre en el caso del circuito teórico que contiene sólo inductancia pura, la mitad de la onda es positiva (todos los valores instantáneos de potencia son positivos) y la otra mitad es negativa (todos los valores instantáneos son negativos), tal como muestra la figura. En este circuito, el eje de las ondas de tensión y de intensidad es también el eje de la onda de potencia, y la frecuencia de esta onda es doble que la de las ondas de intensidad y de tensión.

POTENCIA EN UN CIRCUITO QUE CONTIENE *sólo inductancia*



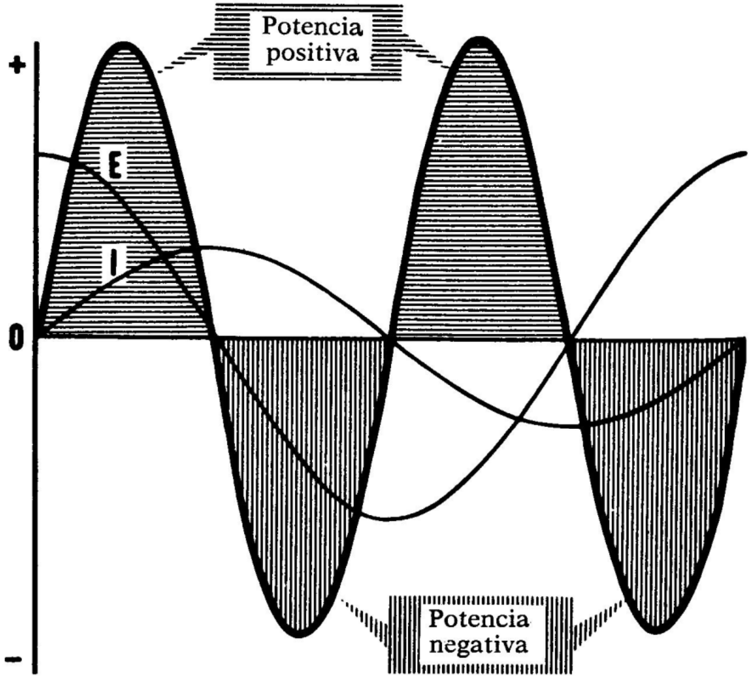
Potencias positiva y negativa

La parte de una onda de potencia que está por encima del eje cero corresponden a los valores instantáneos de la «potencia positiva» y la que está por debajo, a los de «potencia negativa». La potencia positiva representa la potencia suministrada al circuito por la fuente de energía eléctrica, mientras que la potencia negativa representa la potencia que el circuito devuelve a dicha fuente.

En el caso de un circuito inductivo puro, la potencia positiva suministrada al circuito se emplea en crear un campo magnético. Cuando este campo desaparece, devuelve a la fuente toda la energía empleada en crear el campo. Como un circuito con sólo inductancia (suponiendo fuese posible tal circuito en la práctica) no consume potencia para generar calor, luz u otro tipo de energía, la potencia consumida por él será nula, aunque la intensidad de la corriente puede ser grande.

La potencia real consumida en un circuito se calcula restando la potencia negativa de la potencia positiva.

POTENCIAS POSITIVA Y NEGATIVA



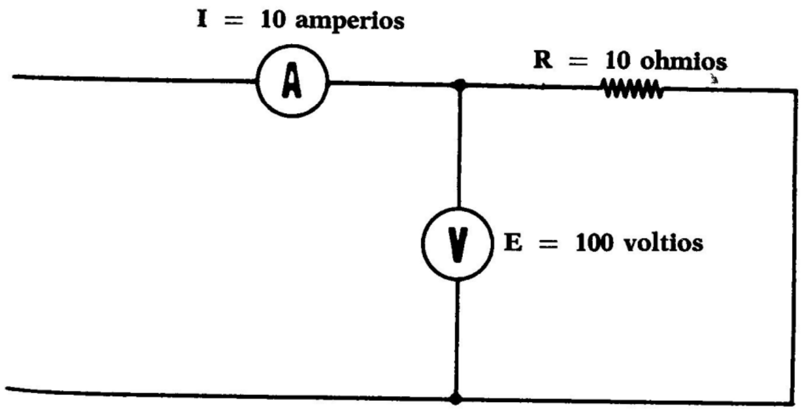
Factor de potencia

Cuando la intensidad y la tensión están en fase, el producto de sus valores eficaces es la potencia en vatios, lo mismo que en los circuitos de c.c. Si la intensidad y la tensión no están en fase, el producto de sus valores eficaces se llama «potencia aparente» y se expresa en «voltio-amperios, o voltamperios». La potencia verdadera en vatios se convierte entonces en $I^2 R$, o E^2/R, o potencia consumida por la resistencia del circuito. Observe que es perfectamente posible que una fuente produzca muchos voltamperios de potencia aparente mientras la verdadera disipación de potencia del circuito, en vatios, sea muy pequeña, e incluso cero.

La relación entre la potencia en vatios y los voltamperios de un circuito se llama «factor de potencia». En un circuito resistivo puro, la potencia en vatios, o potencia verdadera, es igual al producto de los valores eficaces de la tensión y la intensidad (o potencia aparente); así el «factor de potencia» en un circuito que sólo contenga resistencia, es igual a la unidad.

Cuando el factor de potencia es menor que la unidad, se le expresa como fracción decimal.

FACTOR DE POTENCIA EN CIRCUITOS CON RESISTENCIA



$$\text{Potencia} = I^2R \text{ o } \frac{E^2}{R} \text{ vatios}$$

$$\text{potencia aparente} = E \times I \text{ voltamperios}$$

$$\text{Factor de potencia} = \frac{\text{vatios}}{\text{voltamperios}}$$

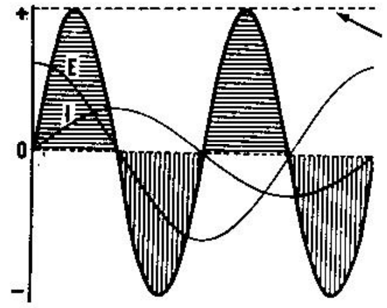
$$\text{Factor de potencia} = \frac{I^2R}{I \times E} \text{ o } \frac{E^2/R}{I \times E} = \frac{1000}{1000} = 1$$

Factor de potencia = 1 en un circuito que sólo posee resistencia.

Potencias aparente y verdadera

En la práctica todo circuito inductivo contiene alguna resistencia, y el ángulo de fase (que depende de la relación entre la reactancia inductiva y la resistencia) es siempre menor que 90 grados. Para ángulos de fase menores de 90 grados, la potencia positiva excede siempre de la potencia negativa, y la diferencia entre ambas representa la potencia que en realidad es consumida por la resistencia del circuito. Por ejemplo, si el circuito contiene iguales cantidades de reactancia inductiva y de resistencia, el ángulo de fase es 45 grados y la potencia positiva excede de la potencia negativa, como abajo se muestra.

Angulo de fase 90° (la potencia negativa es igual a la potencia positiva)

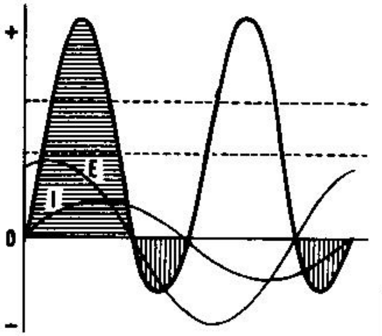


Potencia aparente = $E \times I$ = = voltamperios

Eje de la onda de potencia — la potencia real es nula

$$\text{F.P.} = \frac{I^2R \text{ ó } E^2/R}{\text{voltamperios}} = 0$$

Fase 45° (la potencia positiva excede de la potencia negativa)



Potencia aparente $E \times I$ = voltamperios

Eje de la onda de potencia — potencia real consumida (I^2R)

$$\text{F.P.} = \frac{I^2R}{\text{voltamperios}} = 0{,}7$$

SI DISMINUYE EL ANGULO DE FASE AUMENTA LA POTENCIA REAL

El valor medio correspondiente a los diferentes valores instantáneos de la potencia, llamado «potencia verdadera» o simplemente «potencia», se representa por un eje trazado a mitad de distancia entre los valores máximos opuestos de la onda. Cuando el ángulo de fase aumenta, el eje se acerca al de tensión e intensidad. En circuitos de c.a. la potencia aparente se halla multiplicando la tensión por la intensidad, lo mismo que en circuitos de c.c. (potencia aparente = tensión × intensidad). Cuando se divide la potencia aparente por la potencia verdadera, la fracción decimal resultante es el factor de potencia.

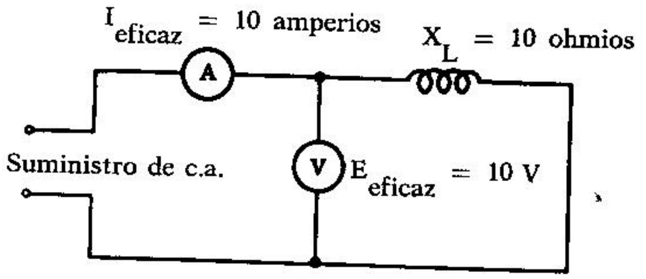
La potencia aparente y la potencia verdadera o real en los circuitos de c.a. son iguales únicamente cuando el circuito sólo posee resistencia. La parte de la potencia que recibe el circuito y que devuelve a la fuente alternativamente, potencia empleada en formar el campo magnético y devuelta al desaparecer éste, se llama también «potencia reactiva» ya que no produce calor ni luz, pero requiere el paso de corriente en el circuito.

Factor de potencia

Ya ha estudiado que en un circuito que sólo posee resistencia I^2R oE^2/R (potencia en vatios), es igual a *EI* (potencia aparente), y que el factor de potencia es la unidad. El factor de potencia es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente.

En un circuito que además de resistencia posea inductancia existe un ángulo de fase, y la potencia en vatios no es igual a la potencia aparente. Por tanto, el factor de potencia estará comprendido entre cero y la unidad.

FACTOR DE POTENCIA EN UN CIRCUITO INDUCTIVO PURO



$I_{eficaz} \times E_{eficaz}$ = potencia aparente (VA) = 1.000

I^2R ó E^2/R = potencia (vatios) = 0

$$\text{F.P.} = \frac{\text{potencia}}{\text{potencia aparente}} = \frac{\text{vatios}}{\text{voltamperios}} = \frac{0}{1.000} = 0$$

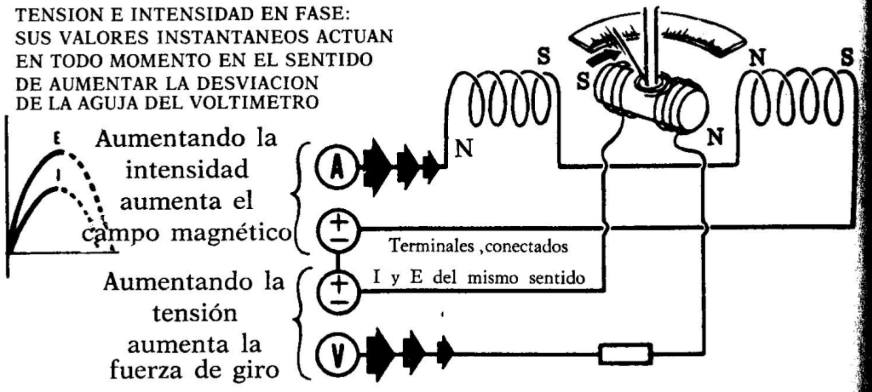
El factor de potencia determina cuál es el porcentaje de la potencia suministrada que se consume como potencia útil, y cuál es el porcentaje que se devuelve a la fuente como potencia reactiva.

El factor de potencia en un circuito inductivo puro es cero. El ángulo de fase es 90°.

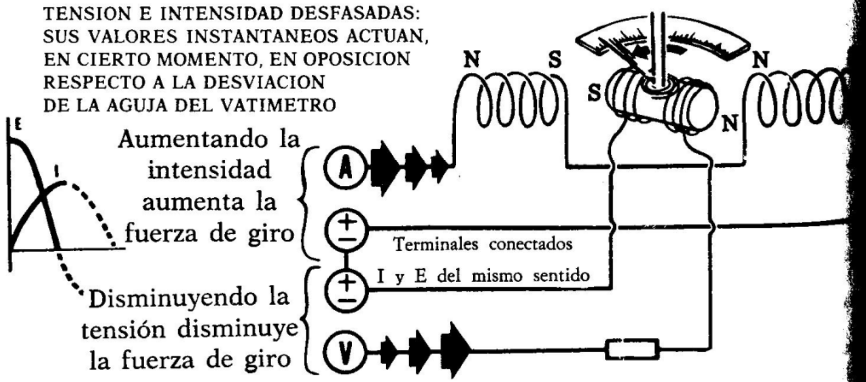
Medición de la potencia

Como el producto de la intensidad por la tensión correspondientes a un circuito, es la potencia aparente y no la potencia real, se utiliza un vatímetro para medir la poten- cia consumida en un circuito de c.a. Las lecturas del voltímetro y el amperímetro no son afectadas por la diferencia de fase entre la intensidad y la tensión en el circuito, ya que la lectura del voltímetro está afectada únicamente por la tensión y la lectura del amperímetro lo está únicamente por la intensidad. La lectura del vatímetro es afectada por la intensidad, por la tensión y, también, por la diferencia de fase entre ellas, como abajo se muestra gráficamente.

Cuando la tensión y la intensidad están en fase, la intensidad aumenta al mismo tiempo que la tensión y actúan conjuntamente para aumentar la fuerza de giro del indu- cido o bobina móvil del instrumento de medida, que mueve la aguja o índice.



Si la intensidad se retrasa con respecto a la tensión, el campo magnético del medi- dor no aumenta simultáneamente con la intensidad de la corriente que pasa por la bobina móvil. En consecuencia la fuerza que hace desplazarse a la aguja del vatímetro es menor. La potencia indicada es menor que cuando la tensión y la intensidad, respec- tivamente de las mismas magnitudes que antes, están en fase.



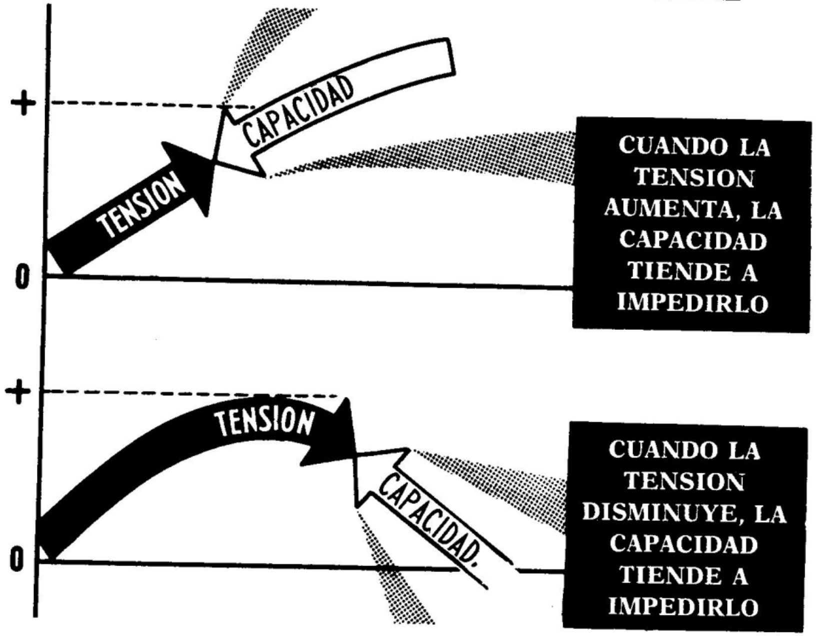
Análogamente, si la intensidad adelanta a la tensión, la fuerza o intensidad campo del medidor y la intensidad de corriente de la bobina móvil tampoco aumenta simultáneamente. El resultado es una lectura del vatímetro más baja, y la potencia consumida en el circuito es también menor que la potencia aparente.

§6: CAPACIDAD EN CIRCUITOS DE C.A.

Capacidad

Así como en los circuitos inductivos la inductancia se opone a toda variación de la intensidad, también existen otros circuitos que tienen la propiedad de oponerse a las variaciones de la tensión. Esta oposición a las variaciones de tensión es debida a la «capacidad» del circuito, así como la oposición a las variaciones de la intensidad era debida a la «inductancia». Tampoco podrá Vd. ver realmente ahora la capacidad, pero no obstante, su efecto se evidencia en muchos circuitos eléctricos.

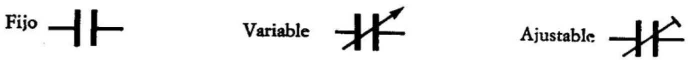
La capacidad se opone a toda variación de la tensión del circuito



Debido a que en c.c., generalmente la tensión sólo varía en los momentos de establecerse y desaparecer, la capacidad afecta a los circuitos de c.c. sólo en estos instantes. Sin embargo, en los circuitos de c.a. la tensión está variando continuamente, por lo que el efecto de la capacidad es continuo. El valor de la capacidad presente en un circuito depende de las características físicas de construcción del circuito y los dispositivos eléctricos utilizados. La capacidad puede ser tan pequeña que su efecto sobre las variaciones de tensión del circuito sea despreciable.

Los dispositivos eléctricos que se emplean para aumentar la capacidad en un circuito se llaman «condensadores». Los símbolos de circuito utilizados para indicar un condensador son los representados a continuación.

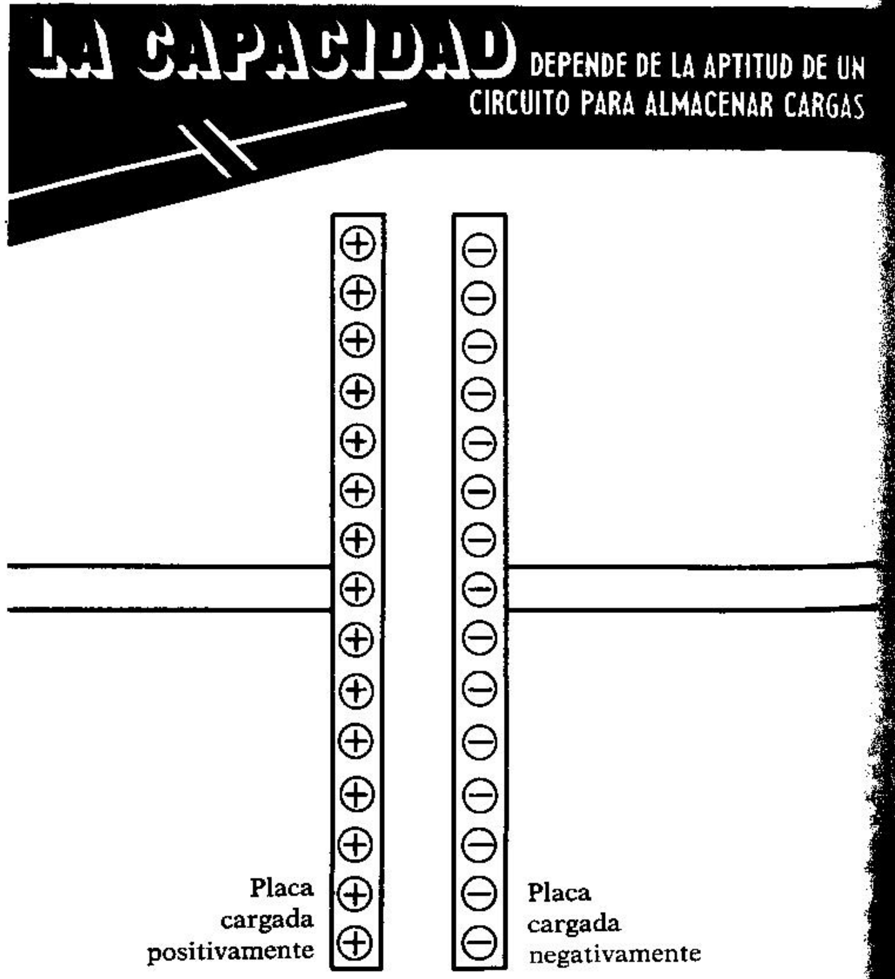
Símbolos de condensadores



Capacidad *(continuación)*

La capacidad existe en un circuito a causa de que ciertas partes de éste son capaces de almacenar cargas eléctricas.

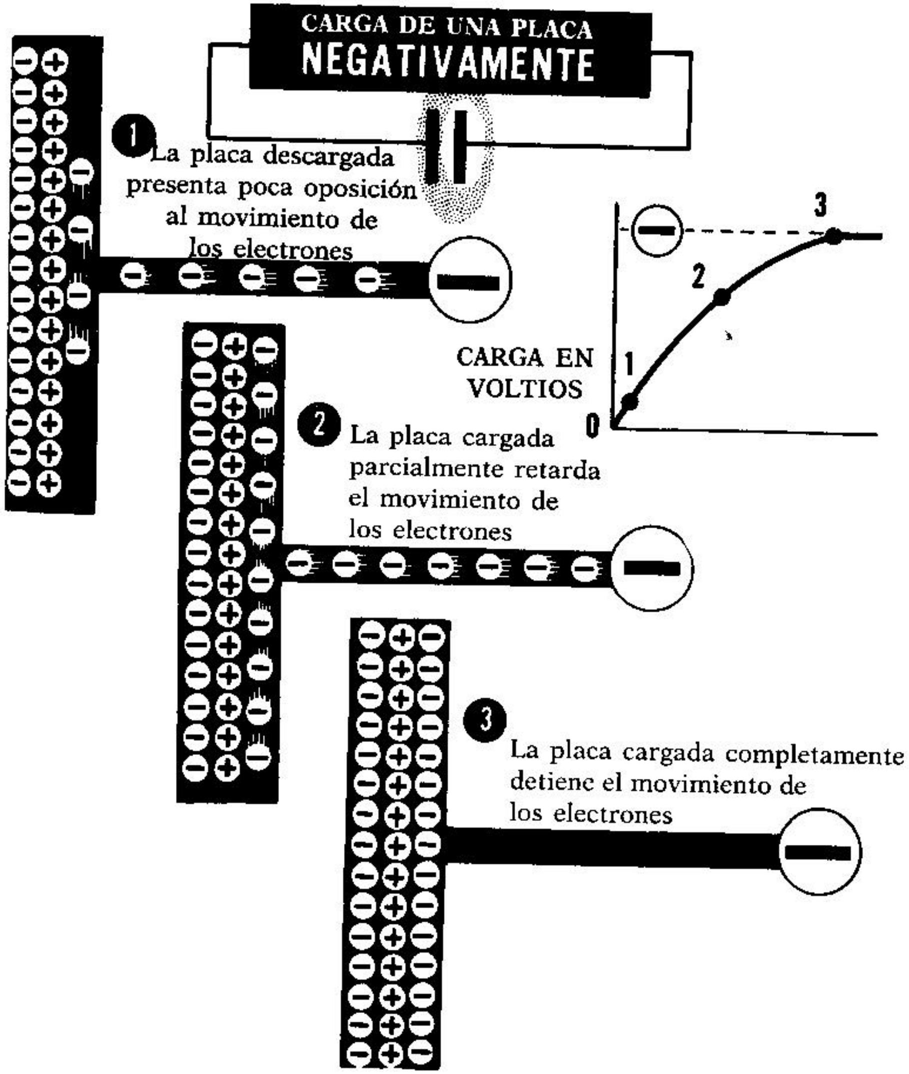
Considere dos placas metálicas planas colocadas paralelamente entre sí, pero sin tocarse. Cuando estudió las páginas que tratan de la electricidad estática aprendió que estas placas se pueden cargar positiva o bien negativamente, dependiendo de la carga que se las transfiera. Si está cargada negativamente, significa que posee exceso de electrones, y si lo está positivamente significa que ha cedido parte de sus electrones. Así, las placas pueden tener exceso o carencia de electrones.



Capacidad *(continuación)*

Para cargar las placas se requiere una fuerza eléctrica. Cuanto mayor sea la carga que se desea en una u otra placa, mayor será la fuerza eléctrica necesaria.

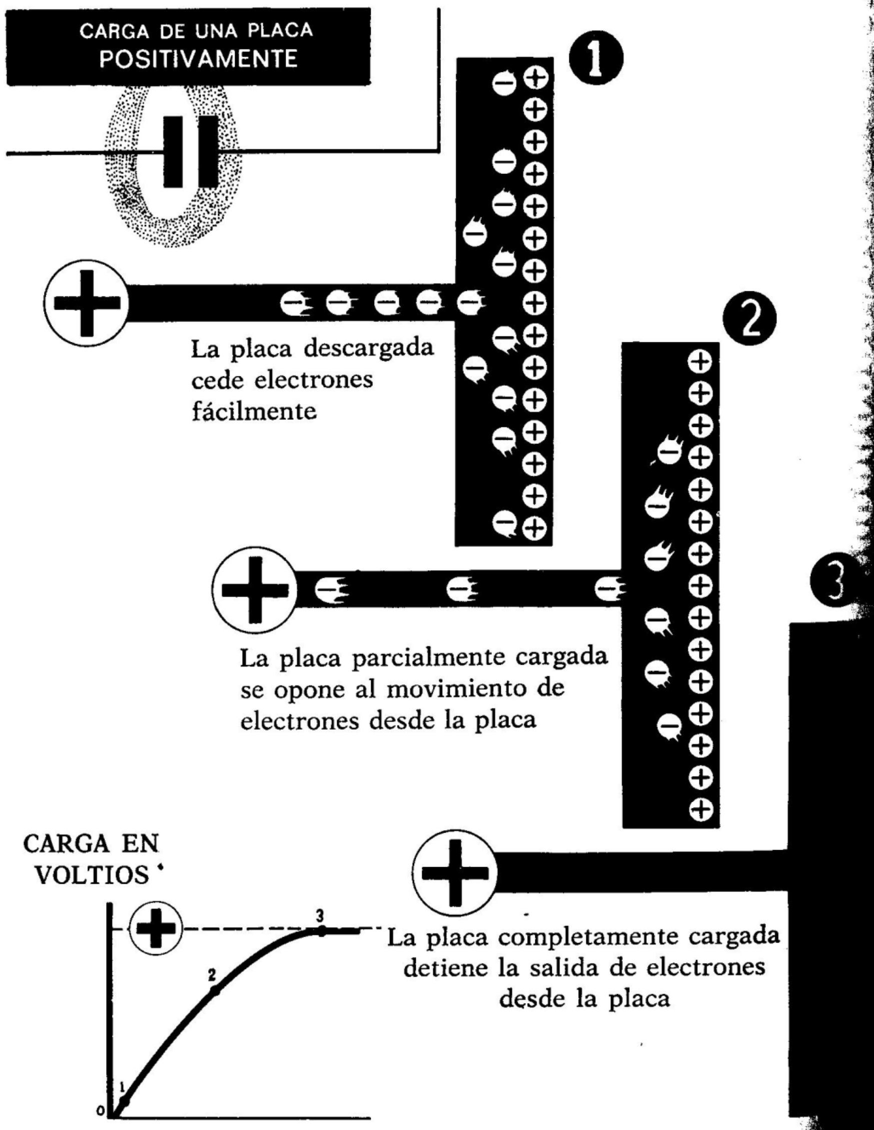
Para cargar negativamente una placa hay que dotarla de electrones extra tomados en una fuente de carga negativa. La fuerza necesaria para introducir los primeros electrones es pequeña, por lo que éstos pasan fácilmente a la placa, pero una vez situados en ésta, se oponen al paso de nuevos electrones, ya que las cargas del mismo signo se repelen, por lo que la fuerza eléctrica necesaria para introducir nuevos electrones deberá ser cada vez mayor. Cuando la fuerza de repulsión que se opone a la entrada en la placa de nuevos electrones llega a igualar a la fuerza eléctrica disponible para introducirlos (para «cargar» la placa), ya no se desplazarán más electrones a la placa.



Capacidad *(continuación)*

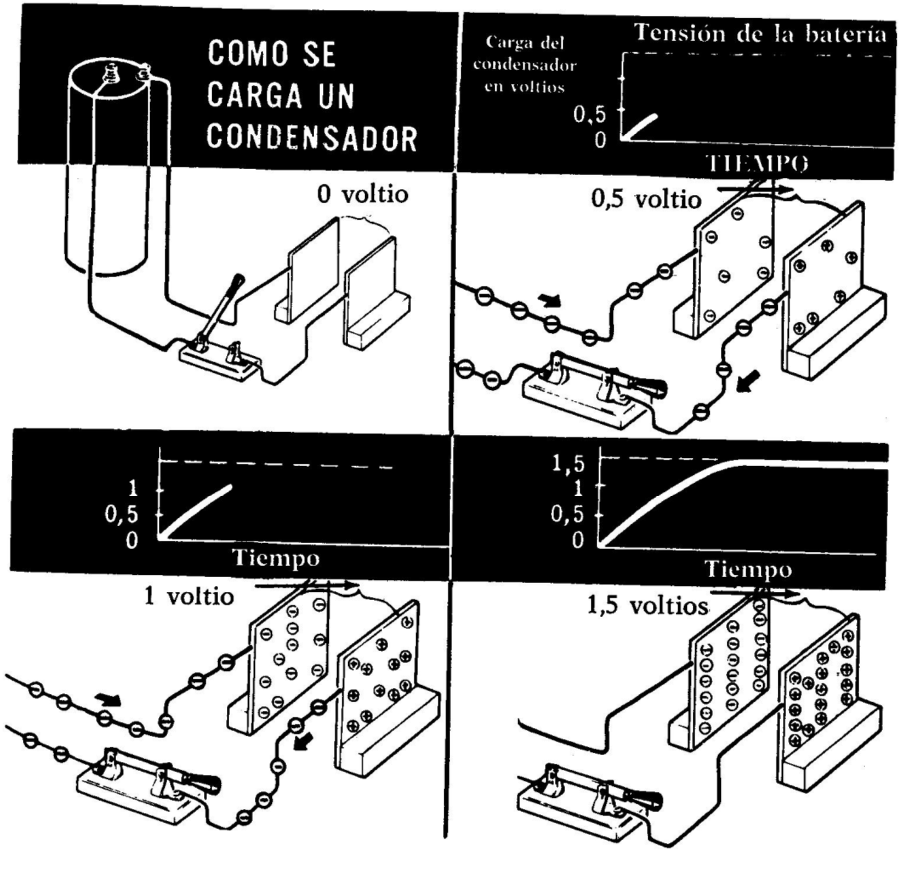
Análogamente, cuando se extraen electrones de una placa por la atracción de una carga positiva, la placa se hace más positiva cada vez. Los primeros electrones salen de la placa fácilmente pero, cuando salen más electrones, se crea una fuerte carga positiva en la placa. Esta carga positiva, al atraer los electrones que se desean extraer, hace que sea cada vez más difícil expulsar de ella los electrones.

Cuando esta fuerza positiva de atracción llega a ser igual a la fuerza eléctrica de extracción o de carga, ya no salen más electrones de la placa.



Capacidad *(continuación)*

Para comprobar el efecto de la capacidad sobre la tensión en un circuito, suponga que éste contiene un condensador de dos placas, un interruptor y una pila seca, como abajo se muestra. Si ambas placas están descargadas y el interruptor abierto, no pasará corriente y la tensión entre las dos placas será nula.



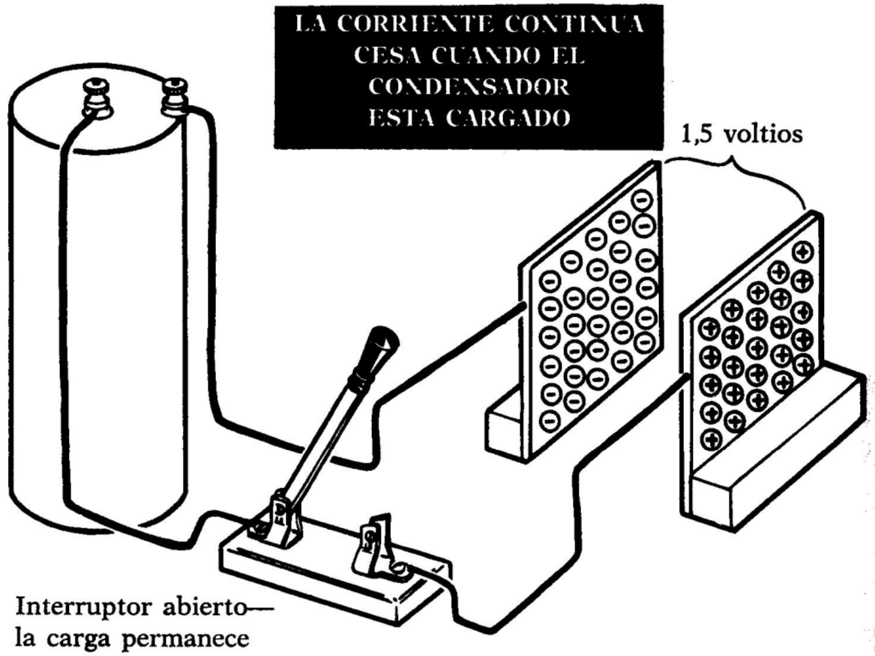
Cuando se cierra el interruptor, la batería suministra electrones a la placa conectada al terminal negativo, y toma electrones de la placa conectada al terminal positivo.

La tensión entre las dos placas será finalmente igual a la tensión entre los terminales de la pila, es decir, 1,5 voltios; pero esto no ocurrirá en seguida a causa de que, para que exista una tensión entre las dos placas, una debe tomar electrones para cargarse positivamente, y para que ello ocurra es necesario cierto tiempo. Cuando los electrones entran en la placa unida al terminal negativo de la pila, se crea una carga negativa que se opone a que entren más electrones en la placa, y cuando los electrones expulsados de la placa unida al terminal positivo, se crea una carga positiva que se opone a la extracción de más electrones de la placa.

Esta acción ejercida por las dos placas se llama «capacidad». Se opone a la variación de tensión (desde cero, hasta 1,5 voltios), retardando la variación durante un cierto tiempo, aunque no impide que tenga lugar la variación.

Capacidad *(continuación)*

Al abrir el interruptor las placas permanecen cargadas porque no hay camino de descarga entre las dos placas. En tanto no exista este camino, la tensión entre las placas se mantendrá en 1,5 voltios y, si se cierra nuevamente el interruptor, el efecto sobre el circuito será nulo puesto que el condensador está ya cargado.



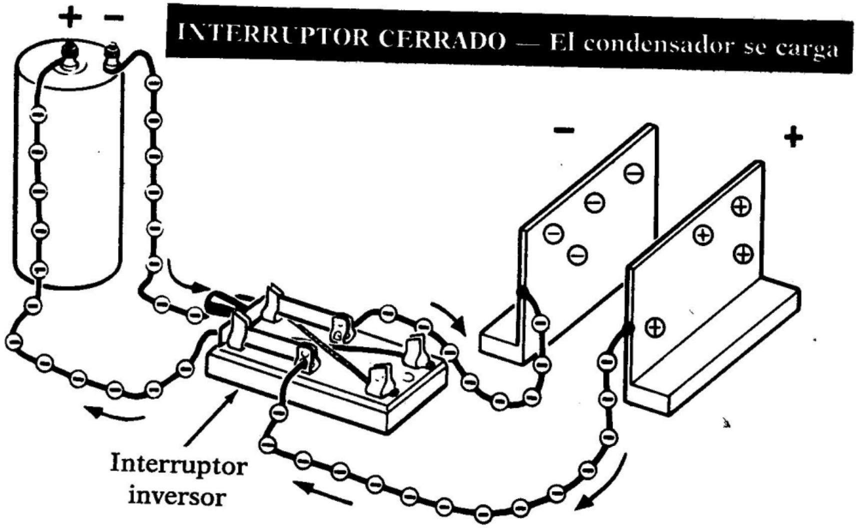
Si la fuente de tensión es de c.c. y el circuito es capacitivo, la corriente circulará sólo hasta que se cargue el condensador. Si en el circuito intercalamos un amperímetro que nos mida la intensidad de la corriente, observaremos que al cerrar el interruptor la intensidad es elevada (cuando las placas del condensador no están cargadas) y a continuación va disminuyendo (a medida que el condensador se carga) para terminar anulándose cuando el condensador está cargado y la tensión entre sus placas es igual a la de la fuente de alimentación de c.c.

Esta corriente que carga a un condensador sólo dura unos momentos después de cerrar el interruptor. Después de esta corriente momentánea, la corriente cesa, ya que las placas del condensador están separadas por un aislante que no permite el paso de los electrones a través de él. Así, los condensadores no permitirán que en el caso de corriente continua, ésta circule permanentemente en el circuito.

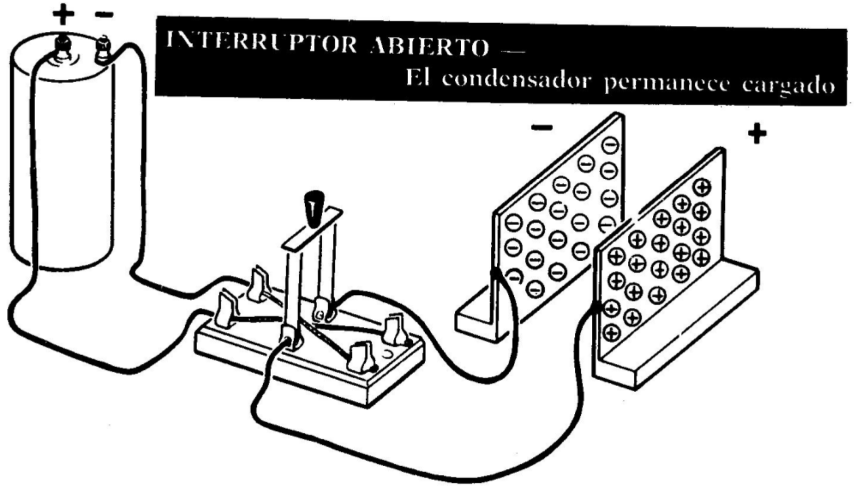
Capacidad *(continuación)*

El condensador bloquea o impide el paso de la corriente continua, pero no ocurre lo mismo si se trata de corriente alterna, permitiendo que ésta pase por el circuito. Para comprenderlo considere lo que ocurre en un circuito de c.c. si se utiliza un interruptor de dos posiciones con la pila seca, a fin de invertir la carga de cada placa cada vez que se cierra el interruptor, primero en una posición y luego en la otra.

Cuando se cierra inicialmente el interruptor, el condensador se carga y cada placa adquiere la misma polaridad que la del terminal de la pila al cual está conectada.

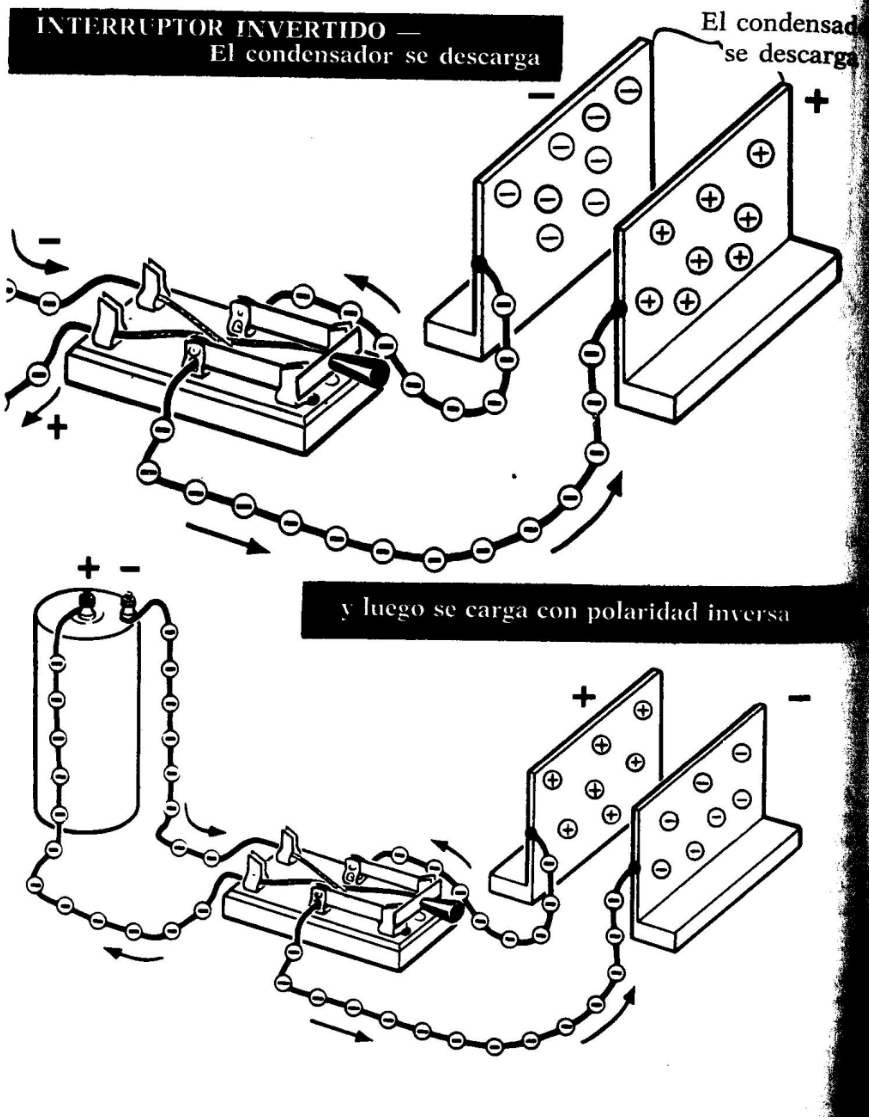


Cuando se abre el interruptor, el condensador retiene las cargas en sus placas y la diferencia de potencial entre ellas es igual a la tensión de la pila.



Capacidad *(continuación)*

Si luego se cierra el interruptor en su posición original, no pasa corriente ya q el condensador está cargado en esa polaridad. Sin embargo, si se cierra el interruptor la otra posición, las placas del condensador quedan conectadas a los terminales de pila de polaridad opuesta a sus cargas. La placa cargada positivamente queda conecta al terminal negativo de la pila y tomará electrones de la pila, primero para neutraliz la carga positiva, y luego para cargarse negativamente hasta que la carga del conde sador sea de la misma polaridad y adquiera la misma tensión que la pila. La pla que poseía carga negativa cede electrones a la pila, ya que debe tomar una carga po tiva del terminal positivo de la pila al que está conectada.



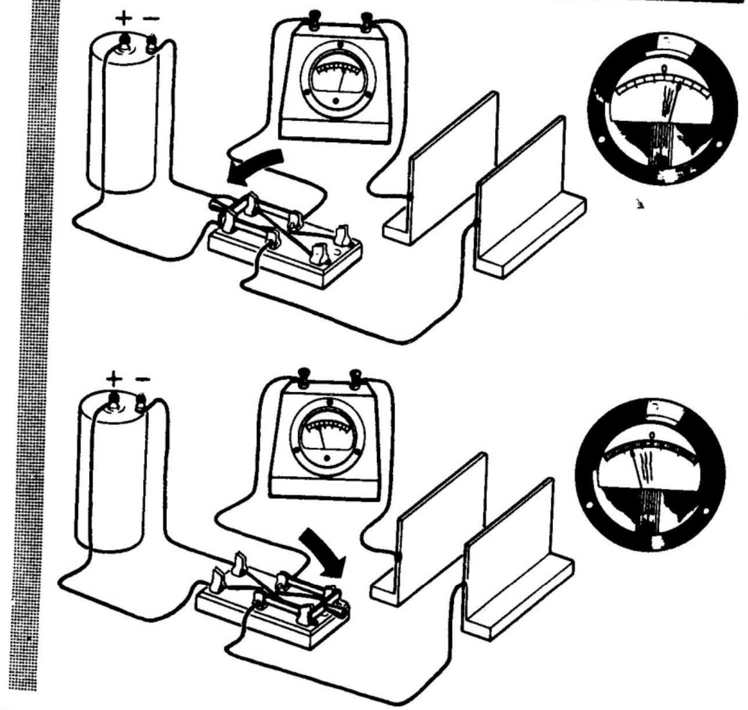
Capacidad *(continuación)*

Si se intercala un amperímetro con cero en el centro de la escala, de forma que permita la lectura de la intensidad en ambos sentidos, en serie con una de las placas del condensador, el amperímetro indicará el paso de una corriente cada vez que se carga la placa.

Cuando se cierra inicialmente el interruptor de dos posiciones en una de ellas, el amperímetro indicará el paso de corriente en el sentido que corresponda a la carga original. Luego, cuando se cierre el interruptor en la otra posición, lo que equivale a conectar la pila con polaridad invertida, el amperímetro indicará el paso de una corriente en sentido contrario lo que corresponde a la descarga primeramente de la placa y después su carga con polaridad opuesta.

El amperímetro sólo indicará un paso momentáneo de la corriente cada vez que se invierte la polaridad de la pila.

CORRIENTE DE CARGA Y DESCARGA DE UN CONDENSADOR CUANDO SE INVIERTE LA POLARIDAD DE LA FUENTE DE TENSION



Suponga que mediante el interruptor pudiese invertir la polaridad de la pila tan rápidamente que en el instante en que las placas del condensador se cargan con una polaridad, se invirtiese la polaridad de la pila. La aguja del amperímetro se movería ahora continua y alternativamente, indicando primero el paso de la corriente en un sentido y luego en sentido contrario. Ya sabemos que los electrones no pueden pasar a través del aire o del aislante que separa una placa de la otra, pero el instrumento indica que la corriente está circulando continuamente en el circuito en ambos sentidos alternativamente, de la misma forma como si los electrones pudiesen pasar de una a otra placa del condensador.

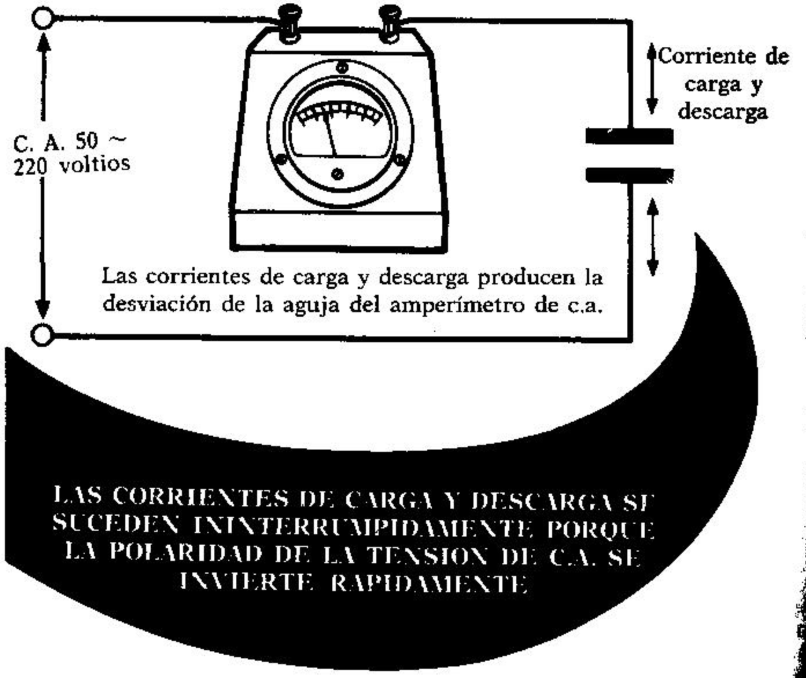
Capacidad *(continuación)*

Si se emplea una fuente de tensión de c.a. en lugar de la pila seca y del interruptor inversor, la polaridad de la fuente de tensión cambia automáticamente cada ciclo. Si la frecuencia de la tensión de c.a. es suficientemente baja, el amperímetro indicará paso de corriente en ambos sentidos, cambiando cada semiciclo cuando se invierte la polaridad de c.a.

La frecuencia comercial estándar o normalizada es 50 c/s o Hz por lo que el amperímetro con escala de cero central no indicará paso de corriente, ya que la aguja del instrumento no se podrá mover con suficiente rapidez. Incluso si lo hiciera, no se podría ver el movimiento debido a su velocidad. Sin embargo, un amperímetro de c.a. intercalado en lugar del amperímetro utilizado muestra el paso constante de corriente cuando se utiliza la fuente de tensión de c.a., indicando que circula una corriente alterna por el instrumento y en todo el circuito.

Recuerde que esta corriente representa la carga y descarga incesante de las placas del condensador, que realmente no existe un paso de los electrones de una a otra placa del condensador. Sin embargo, se considera que hay paso de c.a., a causa de que la corriente circula constantemente en todas las partes del circuito excepto a través del material aislante existente entre las placas del condensador.

C.A. en un circuito capacitivo



La capacidad es la aptitud que tiene un circuito para almacenar una carga, y para aumentar su carga si la tensión aumenta, o para descargarlo si la tensión disminuye. Todo circuito tiene alguna capacidad, y la magnitud de ésta depende de la naturaleza del circuito.

Unidades de capacidad

La unidad fundamental de capacidad es el faradio. Un condensador tiene una capacidad de un faradio si al pasar por él una corriente constante de carga de un amperio durante un segundo, produce una variación de un voltio en el potencial existente entre sus placas.

El faradio es demasiado grande para ser utilizado como unidad práctica en los circuitos eléctricos. A causa de esto se emplean normalmente unidades más pequeñas, que son el microfaradio (μF), igual a una millonésima de faradio, y el micromicrofaradio o picofaradio (pF), igual a una billonésima de faradio. Como en las fórmulas se expresa la capacidad en faradio, debe saber convertir las diversas unidades de capacidad en otras. El procedimiento para el cambio de unidades es el mismo que el utilizado para la conversión de las unidades de tensión, intensidad de corriente, resistencia, etc. Para convertirlas en unidades mayores, la coma decimal se mueve hacia la izquierda, para la conversión de las unidades menores se mueve la coma decimal hacia la derecha.

CONVERSION DE UNIDADES DE CAPACIDAD

MICROFARADIOS A FARADIOS
Correr la coma decimal seis lugares a la izquierda
120 μF = 0,000120 faradios

FARADIOS A MICROFARADIOS
Correr la coma decimal seis lugares a la derecha
8 faradios = 8.000.000 μF

PICOFARADIOS A FARADIOS
Correr la coma decimal doce lugares a la izquierda
1.500 pF = 0,000000001500 faradio

FARADIOS A PICOFARADIOS
Correr la coma doce lugares a la derecha
2 faradios = 2.000.000.000.000 pF

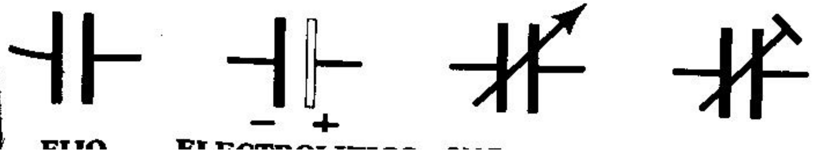
PICOFARADIOS A MICROFARADIOS
Correr la coma seis lugares a la izquierda
250 pF = 0,000250 μF

MICROFARADIOS A PICOFARADIOS
Correr la coma seis lugares a la derecha
2 μF = 2.000.000 pF

Símbolos de capacidad

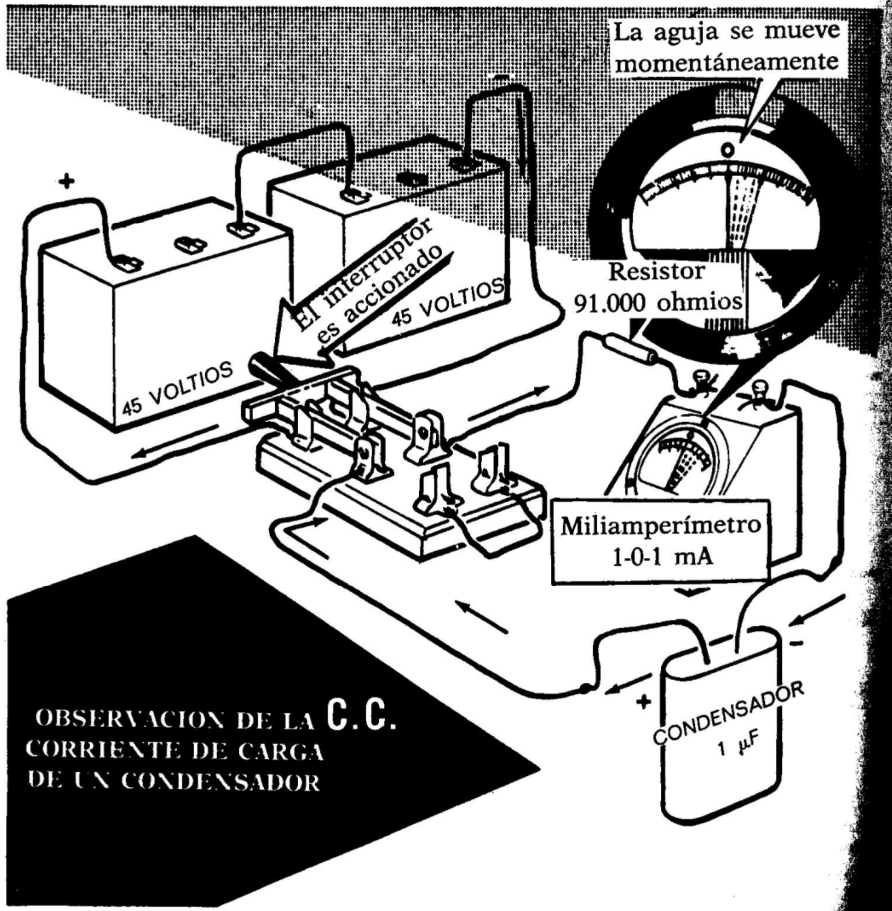
En las fórmulas eléctricas la letra *C* se utiliza para denotar la capacidad en faradios. Los símbolos del circuito para la capacidad son los abajo indicados.

SIMBOLOS DE CONDENSADOR



EXPERIMENTO — Corriente continua en un circuito capacitivo

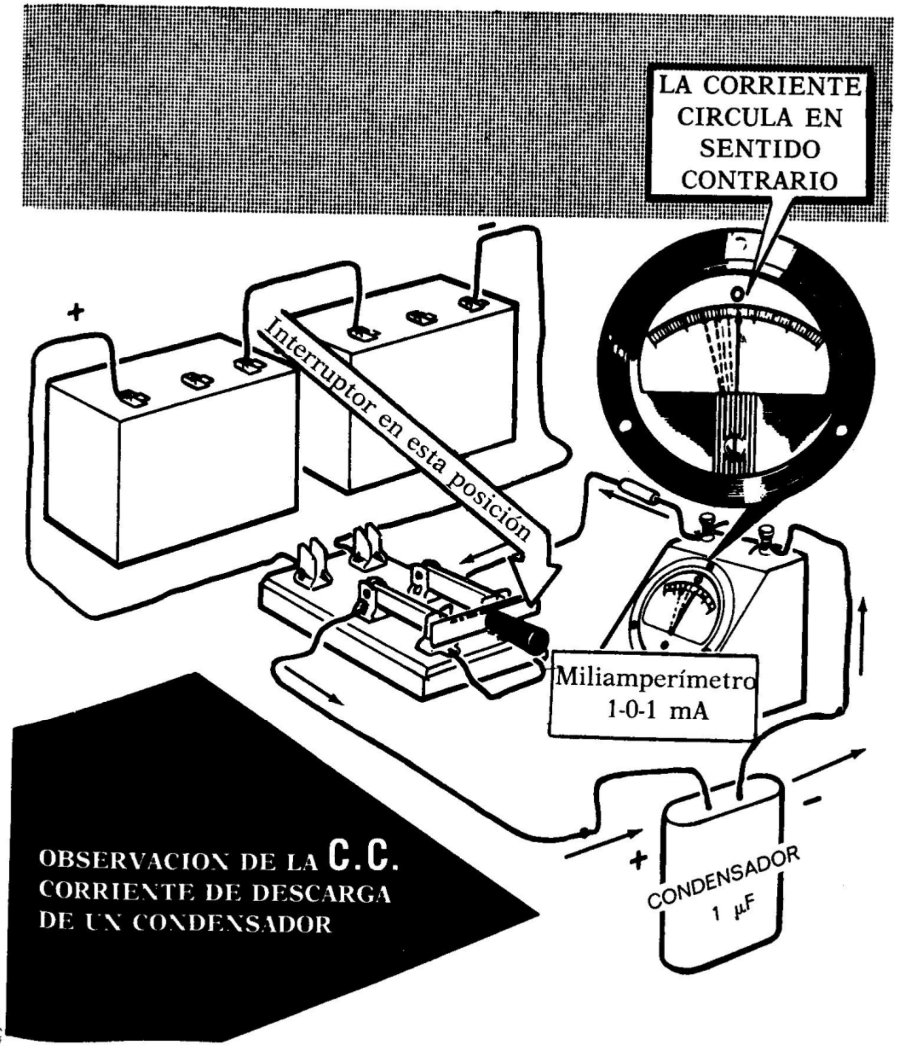
La carga y la descarga de un condensador en un circuito de c.c. se produce en un intervalo de tiempo muy corto. Para comprobar experimentalmente el paso de la corriente durante la carga y la descarga de un condensador, conecte dos baterías de 45 voltios en serie formando una batería de 90 voltios. Luego conecte los conductores de esta batería a dos de los terminales o bornes exteriores de un interruptor bipolar de dos posiciones. Estando el interruptor abierto, conecte un miliamperímetro de 1-0-1 mA con el cero en el centro de la escala y un condensador de 1 μF en serie con un resistor a los bornes centrales del interruptor, como muestra la figura. Finalmente, puentee, es decir, conecte entre sí los otros dos terminales libres restantes del interruptor. La finalidad del resistor de 91.000 ohmios es limitar las sobreintensidades que pueden deteriorar el miliamperímetro. Si acciona el interruptor poniéndolo en la posición correspondiente a los terminales puenteados, verá que no pasa corriente, ya que el condensador está inicialmente descargado, mientras que cuando lo ponga en la posición correspondiente a los terminales de batería, verá que la aguja del instrumento acusa una corriente momentánea, pero vuelve rápidamente a la posición del cero cuando el condensador queda cargado.



EXPERIMENTO — Corriente continua en un circuito capacitivo (continuación)

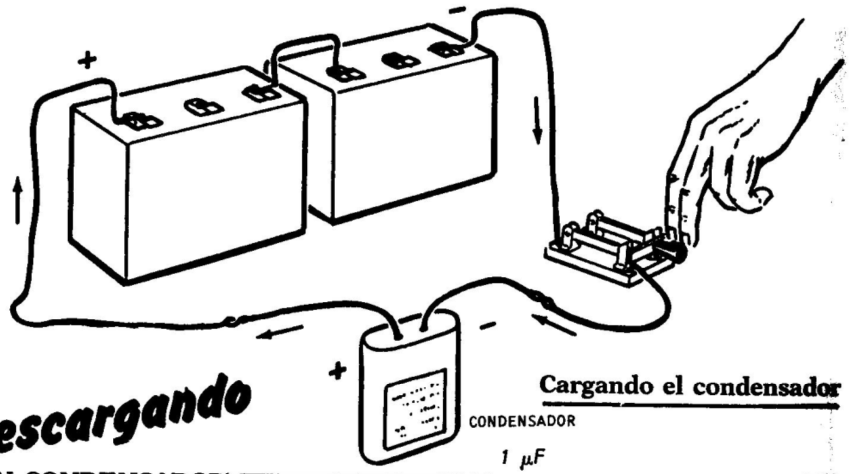
Si ahora abre el interruptor y a continuación lo pone en la posición correspondiente a los terminales puenteados, la aguja del miliamperímetro indica una corriente momentánea en sentido contrario al del que tenía cuando se cerró el interruptor en la otra posición, indicando la descarga del condensador.

Cargue nuevamente el condensador situando el interruptor en la posición conveniente y observe la breve duración de la corriente de carga. Abra el interruptor y vuelva a colocarlo en su posición inicial. Observará que no hay corriente, ya que el condensador está ya cargado. Cuando ponga el conmutador en la posición correspondiente a los terminales puenteados, el paso de la corriente en sentido contrario nuevamente indica la descarga del condensador.

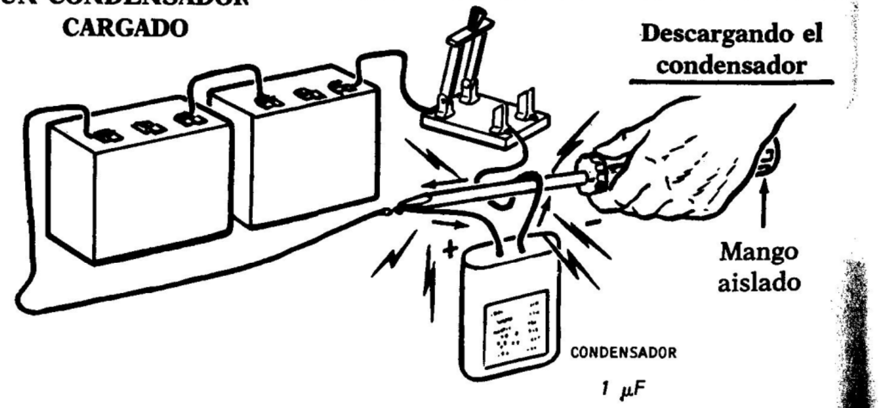


EXPERIMENTO — Corriente continua en un circuito capacitivo (continuación)

Conecte ahora la batería, el condensador y el interruptor según la figura. El condensador se carga cuando se cierra el interruptor. Abra éste y cortocircuite, uniéndolos eléctricamente, los terminales del condensador mediante un destornillador, teniendo cuidado en tocar sólo su mango aislado al cogerlo con la mano. Observe que la descarga del condensador produce una fuerte chispa. Si descargase el condensador tocando con sus dedos los dos terminales, la conmoción eléctrica que recibiría, aunque no es en sí misma peligrosa, podría causarle una sensación desagradable.



Descargando
UN CONDENSADOR CARGADO



Si hace Vd. esto varias veces, verá que la chispa resultante presenta siempre el mismo aspecto. Esto demuestra que la carga que conserva un condensador cuando se suprime la tensión en el circuito es siempre máxima si la corriente empleada en carga es c.c.

PRECAUCION: Nunca debe descargar un condensador mientras esté conectado a la fuente de tensión del circuito, tanto si es una batería como una red o línea de

EXPERIMENTO — Corriente alterna en un circuito capacitivo

Para comprobar experimentalmente que la c.a. circula en un circuito capacitivo, conecte un interruptor, un fusible, un miliamperímetro de 0-50 mA y un condensador de 1 μF entre los terminales del secundario de un transformador reductor, de 240 a 60 voltios. El circuito está ilustrado abajo.

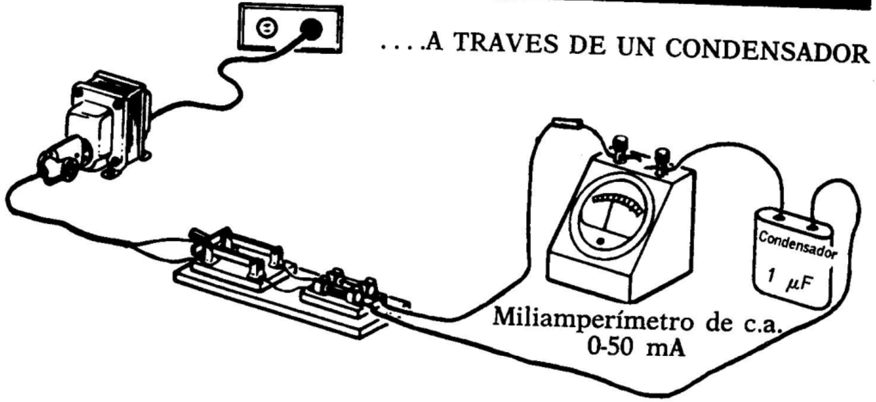
Cuando conecte el primario del transformador a una toma de corriente y esté cerrado el interruptor, verá que el miliamperímetro indica el paso de corriente.

El miliamperímetro marca 20 mA de c.a. permanentemente. Esta corriente permanente es posible a causa de que el condensador está continuamente cargándose y descargándose cuando se invierte la polaridad de la tensión de c.a. Abra el interruptor y puentee o cortocircuite los terminales del condensador con un destornillador. Nuevamente comprobará que el condensador retiene una carga cuando desaparece la tensión de alimentación en el circuito.

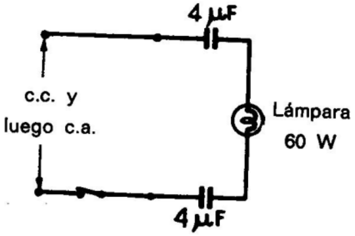
Sin embargo, cuando cierre y abra varias veces sucesivamente el interruptor, descargando el condensador mediante el destornillador cada vez que el interruptor esté en posición abierto, verá que el tamaño y la intensidad de las chispas varían. Esto ocurre a causa de que la cantidad de carga retenida por un condensador en un circuito de c.a. no siempre es la misma, porque la tensión de alimentación del circuito puede resultar suprimida en el momento en que el condensador se esté descargando o no esté completamente cargado todavía.

OBSERVANDO **EL PASO DE LA CORRIENTE ALTERNA...**

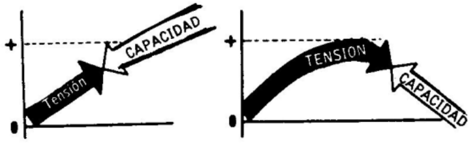
....A TRAVES DE UN CONDENSADOR



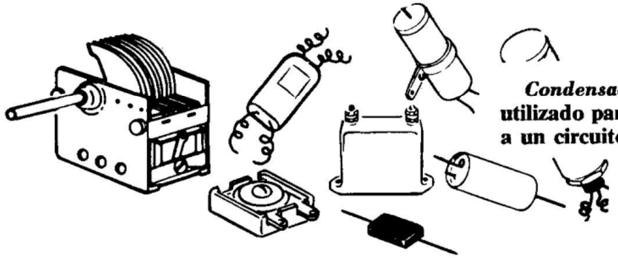
Para demostrar que el condensador bloquea o impide el paso de la c.c., pero permite el paso de la c.a., haga el montaje de circuito representado a la derecha. Cuando se aplica una corriente continua, la lámpara no se enciende, y el voltímetro de c.c. en paralelo con la lámpara dará indicación de cero voltio. Cuando se aplica la c.a., la lámpara se enciende y el voltímetro de c.a. en paralelo con la lámpara da una lectura.



REPASO de capacidad en circuitos de c.a.

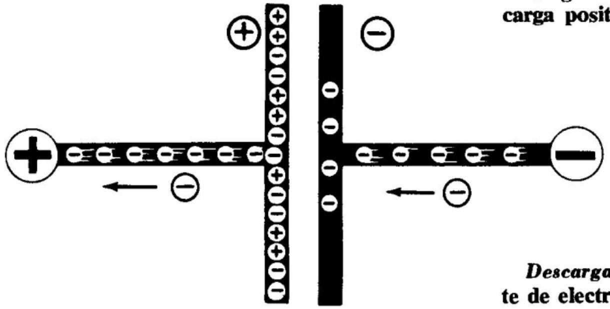


Capacidad. **Propiedad de un circui-to de oponerse a cualquier variación de la tensión en el mismo.**

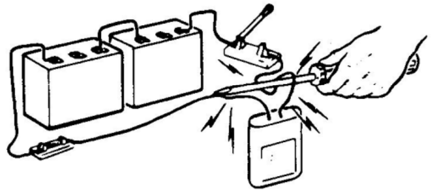


Condensador. **Dispositivo eléctrico utilizado para proporcionar capacidad a un circuito.**

Carga del condensador. **Corriente de electrones que se dirige a una placa y sale de la otra, dando por resultado la carga negativa en una placa y la carga positiva en la otra.**



Descarga del condensador. **Corrien-te de electrones desde la placa negati-vamente cargada de un condensador hasta la placa positivamente cargada, dando como resultado la eliminación de las cargas en las placas.**



Faradio. **Unidad fundamental de capacidad utilizada en las fórmulas eléctricas.**

$$1\ \mu F = \frac{1}{1.000.000}\ \text{faradio}$$

$$1\ pF = \frac{1}{1.000.000.000.000}\ \text{faradio}$$

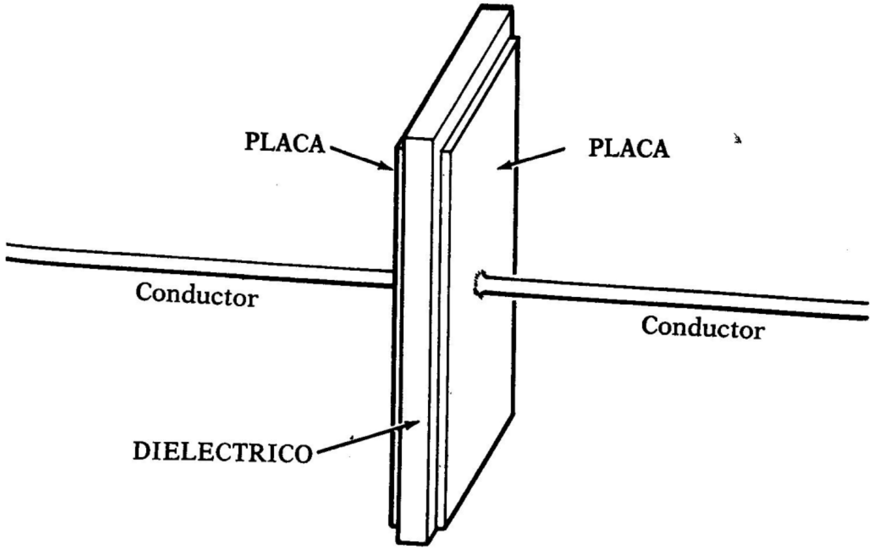
Unidades prácticas de capacidad. **Microfaradio (millonésima de faradio) y picofaradio (billónesima de faradio).**

§ 7: CONDENSADORES Y REACTANCIA CAPACITIVA

Condensadores

Fundamentalmente los condensadores se componen de dos placas que pueden ser cargadas eléctricamente y que están separadas por un material aislante llamado «dieléctrico». Aunque antiguamente los condensadores se construyeron con placas metálicas macizas, los tipos modernos de condensadores utilizan hojas finas de metal, particularmente de aluminio, para las placas. Los materiales dieléctricos comúnmente más utilizados son el aire, la mica y el papel encerado.

Los condensadores SE COMPONEN DE dos placas Y EL dieléctrico



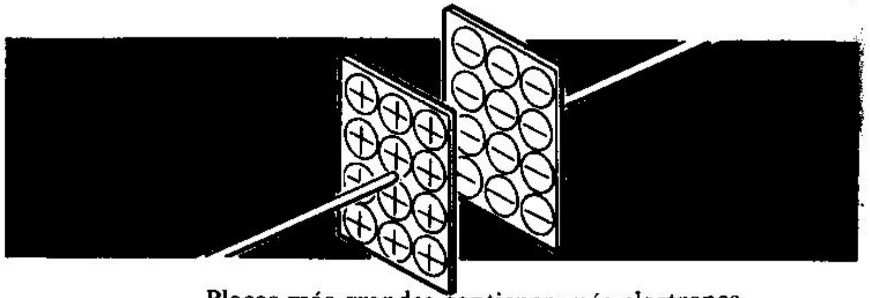
Las placas están formadas por planchas o por hojas metálicas

Los materiales dieléctricos son el aire, la mica y el papel encerado

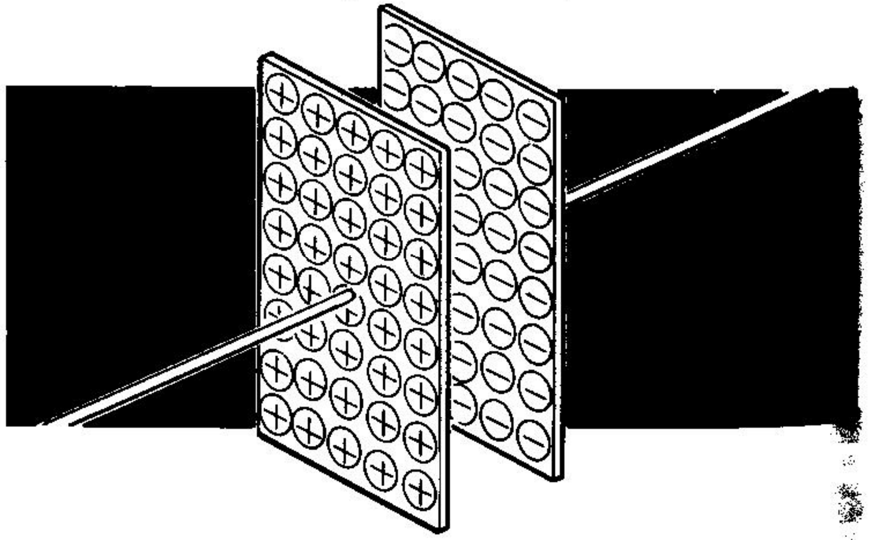
Tres factores básicos afectan la capacidad de un condensador: el área de las placas, la distancia entre ellas (espesor del dieléctrico) y el material utilizado como dieléctrico.

Factores que afectan a la capacidad

El área de la superficie de la placa es un factor muy importante para la determinación del valor de la capacidad, ya que ésta varía directamente con el área de las placas. Una área grande de la placa supone mayor espacio disponible para los electrones en exceso que un área pequeña, por lo que puede acumular una mayor carga. Análogamente, un área grande de placa puede contener y ceder más electrones y, por consiguiente, mantener una carga positiva mucho mayor que la de un área pequeña de placa. Así, el aumento del área de la placa aumenta la capacidad del condensador, y la disminución del área de la placa disminuye la capacidad.



Placas más grandes contienen más electrones



AUMENTANDO EL AREA DE LA PLACA SE AUMENTA LA

Capacid

Factores que afectan a la capacidad *(continuación)*

El efecto mutuo que ejercen dos cuerpos cargados eléctricamente depende de la distancia que los separa. A causa de esto, la capacidad de un condensador cambia cuando cambia la separación entre las placas. Aumenta cuando las placas están más próximas entre sí, y disminuye cuando están más separadas.

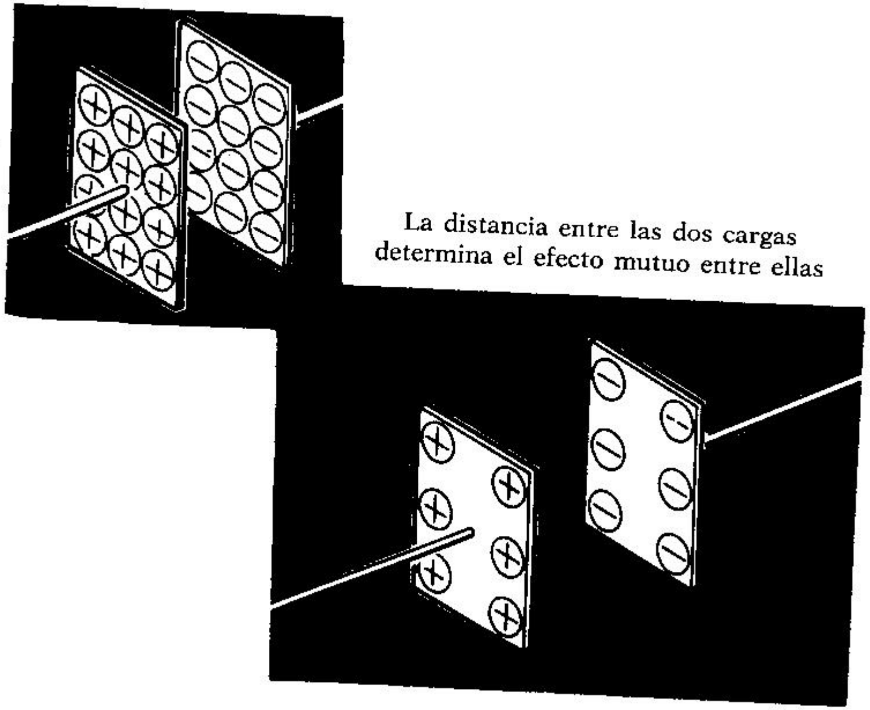
Si Vd. carga un condensador, crea una diferencia de potencial entre sus placas. Esta d.d.p. es proporcional a la distancia entre las placas (y, naturalmente, a la cantidad de carga almacenada).

Dicho esto de otra manera, cuanto más cerca están las placas entre sí, mayor será la carga eléctrica necesaria para elevar la d.d.p. entre ellas hasta un nivel dado.

La capacidad, es decir la aptitud para almacenar una carga, depende pues de la distancia entre las placas del condensador, así como del área de las propias placas.

AUMENTANDO LA DISTANCIA ENTRE LAS PLACAS

Disminuye la capacidad



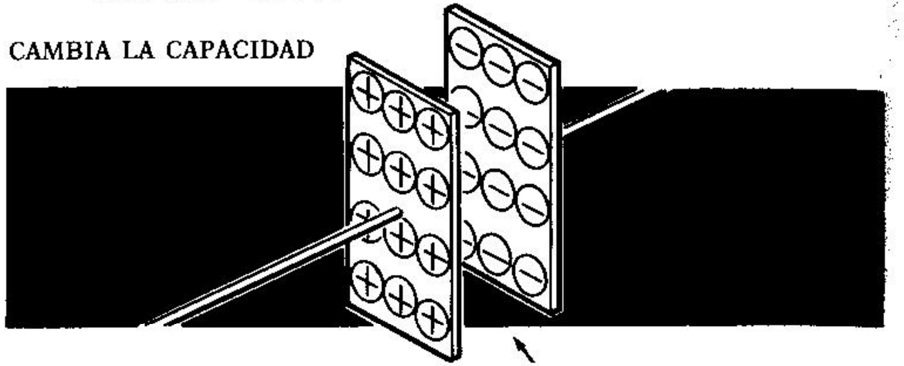
La distancia entre las dos cargas determina el efecto mutuo entre ellas

Factores que afectan a la capacidad *(continuación)*

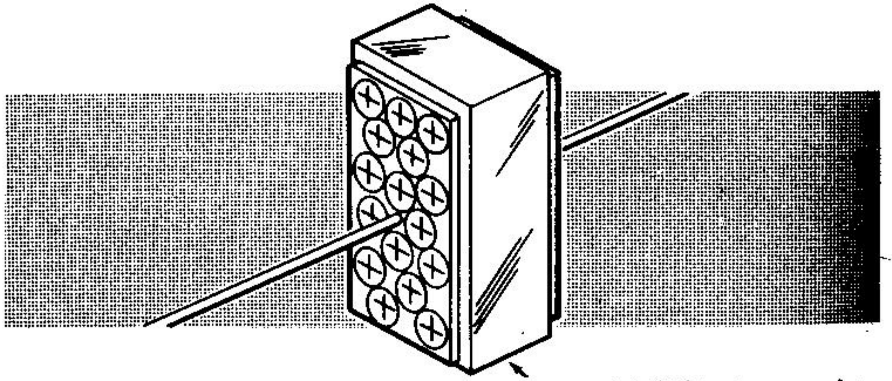
CAMBIANDO EL

MATERIAL **dieléctrico**

CAMBIA LA CAPACIDAD



El material dieléctrico es **aire**



El material dieléctrico es **mica**

El dieléctrico de mica aumenta la capacidad

Utilizando las mismas placas separadas en una distancia fija, la capacidad cambiará si se utilizan diferentes materiales aislantes como dieléctricos. El efecto producido por los diferentes materiales se compara con el del aire. Así, se mide la capacidad del condensador utilizando aire como dieléctrico y la capacidad del mismo cuando se sustituye el aire por el otro material que tratamos de comparar. El cociente entre el valor de esta última capacidad y la anterior nos da un número llamado «constante dieléctrica» del material utilizado como dieléctrico. Esta constante es, por tanto, el número por el que resulta multiplicada la capacidad de un condensador al sustituir el dieléctrico aire por otro material.

Por ejemplo, algunos tipos de papel encerado tienen una constante dieléctrica de 3, lo que significa que si se interpone entre las placas papel encerado, la capacidad será tres veces mayor que si el dieléctrico fuese aire.

Diferentes materiales tienen distintas constantes dieléctricas, por lo que alterarán la capacidad de las placas cuando actúen entre ellas como dieléctrico.

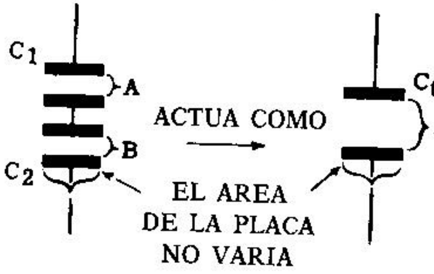
Condensadores en serie y en paralelo

Cuando conecte Vd. condensadores en serie o en paralelo, el efecto sobre la capacidad total es contrario al de los resistores conectados análogamente.

Conectando resistores en serie se aumenta la resistencia total a causa de que se alarga el camino de resistencia por el que pasa la corriente. Pero conectando condensadores en serie disminuye la capacidad total, a causa de que supone un aumento de la distancia de separación entre placas.

Para hallar la capacidad total de condensadores conectados en serie, se emplea una fórmula análoga a la de resistencias en paralelo.

La conexión serie AUMENTA EL ESPESOR DEL DIELECTRICO



UN DIELECTRICO MAS GRUESO DISMINUYE LA CAPACIDAD

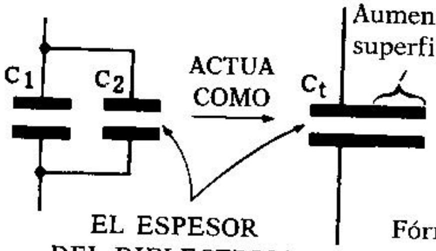
Fórmula de capacidades en serie

$$C_t = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

ó

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots$$

La conexión paralelo AUMENTA EL AREA DE LA PLACA



UNA MAYOR AREA DE PLACA AUMENTA LA CAPACIDAD

Fórmula de capacidades en paralelo

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3$$

Cuando se conectan resistores en paralelo, la resistencia total disminuye a causa de que la sección transversal que recorre la corriente aumenta. La recíproca es cierta para los condensadores conectados en paralelo. La capacidad total aumenta a causa de que aumenta el área que recibe la carga.

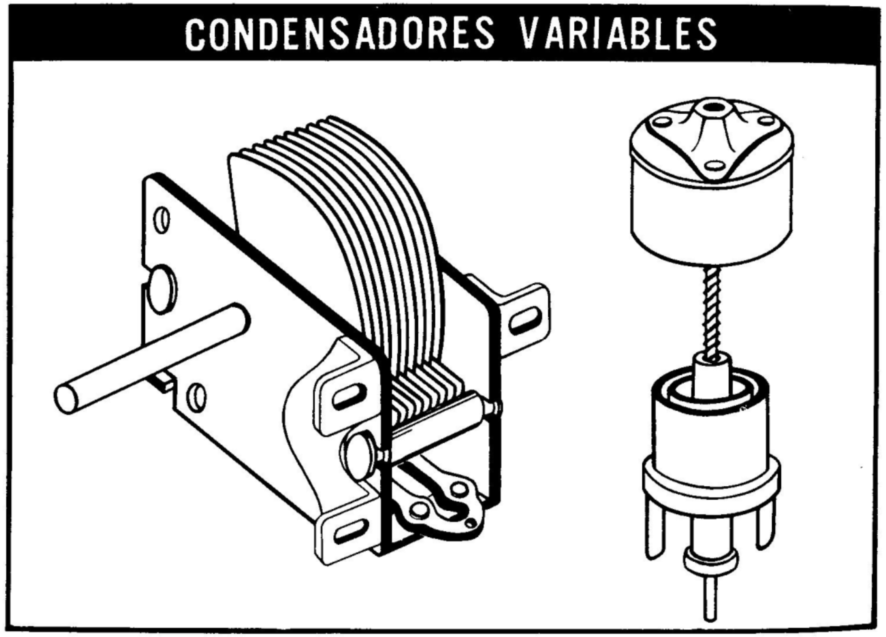
La capacidad total de los condensadores conectados en paralelo se halla sumando los valores de las capacidades correspondientes a los diversos condensadores conectados en paralelo.

Tipos de condensadores

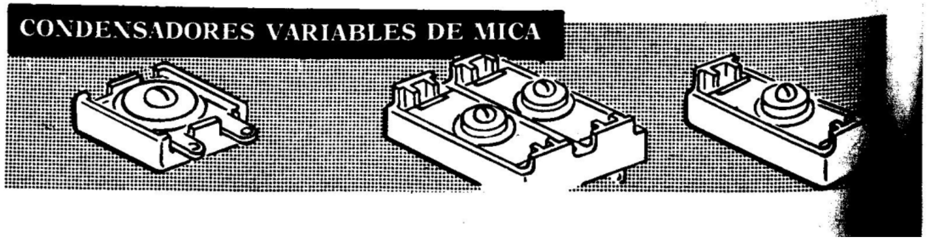
Se utilizan muchas clases diferentes de condensadores en los circuitos eléctricos y electrónicos. Muchos tienen un valor fijo de capacidad, pero algunos circuitos requieren condensadores cuyos valores se puedan variar dentro de ciertos límites.

El tipo más común de condensador variable utiliza el aire como dieléctrico. Un conjunto de placas está montado sobre un eje para que las placas se puedan mover intercalándose entre otro conjunto de placas. El área de la porción de cada placa del conjunto móvil situada enfrente de la placa correspondiente del otro conjunto, aumenta o disminuye al girar el eje, aumentando o disminuyendo la capacidad del condensador.

Las placas pueden ser aspas coplanares o cilindros concéntricos, como se ilustra abajo y a menudo se utiliza el último tipo en paralelo con el primero para proveer un «ajuste fino» de la mínima capacidad.



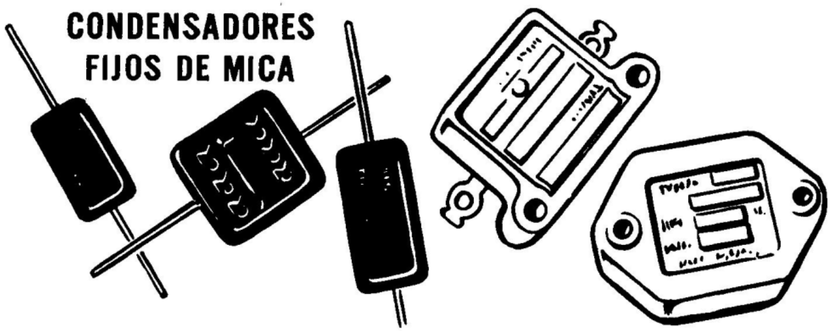
Otro tipo de condensador variable se compone de dos placas con una hoja de mica entre ellas. Se utiliza un ajuste de tornillo para apretar las placas entre sí, con cuyo ajuste se varía la capacidad del condensador. En los condensadores de mayor capacidad de este tipo se utilizan varias capas de placas y micas.



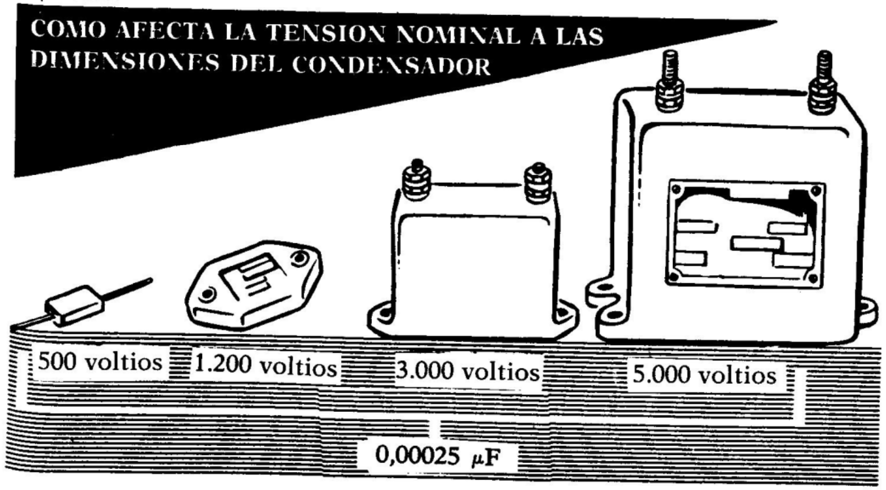
Tipos de condensadores *(continuación)*

Los condensadores fijos de mica se componen de finas placas metálicas separadas por una hoja de mica, y protegidas con una cubierta de plástico moldeado. Estos condensadores se fabrican en una gama de capacidades comprendida entre 10 pF y 0,01 μF.

Se emplean varios tipos de terminales para conectar los condensadores de mica en los circuitos, moldeándose conjuntamente en plástico parte de estos terminales, las placas y el dieléctrico. Al estar encerradas y selladas las partes del condensador en una caja o cápsula de plástico se evita la corrosión y el deterioro de las placas y el dieléctrico, consiguiéndose que el condensador sea mecánicamente resistente.

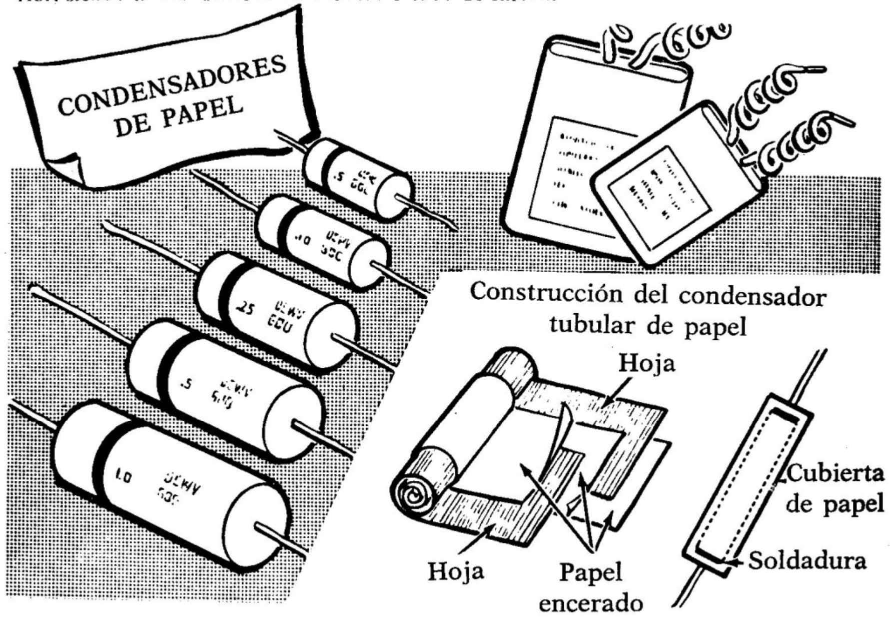


La máxima tensión que puede ser aplicada entre las placas de un condensador está determinada por el espesor del material dieléctrico que actúa como aislante entre las dos placas. Condensadores de una misma capacidad pueden tener diferente tensión nominal, lo que dependerá de la magnitud del espesor del dieléctrico. Si se aumenta este espesor, las placas estarán más separadas, reduciéndose la capacidad por lo que las áreas de las placas tienen que ser aumentadas para compensar la disminución de capacidad. Por ello, los condensadores de tensiones nominales más altas son de mayores dimensiones geométricas, ya que las placas son más grandes y están más separadas. Esto es aplicable a todos los tipos de condensadores, cualquiera que sea el dieléctrico que se utilice. Con el fin que pueda comparar dimensiones, abajo están representados varios condensadores de mica típicos de diversas tensiones nominales, pero el mismo valor de capacidad.

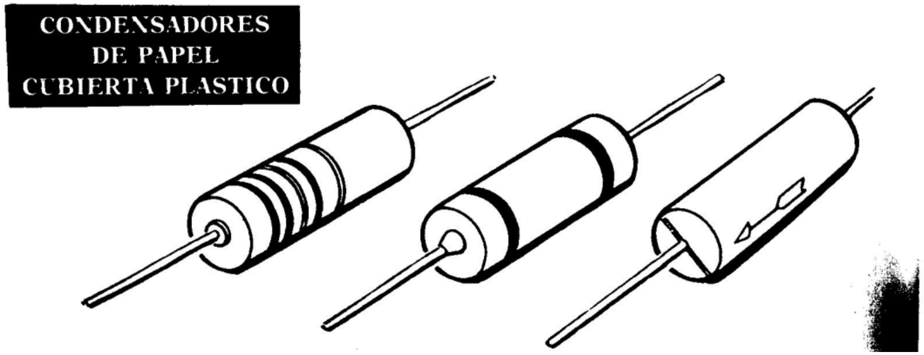


Tipos de condensadores *(continuación)*

En los condensadores de papel se utilizan tiras de hoja metálica como placas, separadas por tiras de papel encerado. Los valores de capacidad de los condensadores de papel cubren la gama de 250 pF a 1 μF para la mayoría de las aplicaciones, aunque se fabrican condensadores de papel más grandes para determinadas aplicaciones. Como se requieren tiras muy largas de papel para obtener una capacidad utilizable, las tiras de papel encerado y de hoja metálica se enrollan juntas formando un cartucho. Este cartucho, incluyendo los conductores fijados a las placas, está sellado (es decir, herméticamente cerrado), con cera para evitar las fugas por humedad y la corrosión de las placas. Para los condensadores de papel se emplean muchas clases diferentes de cubierta exterior, siendo la más sencilla un cilindro o tubo de cartón.

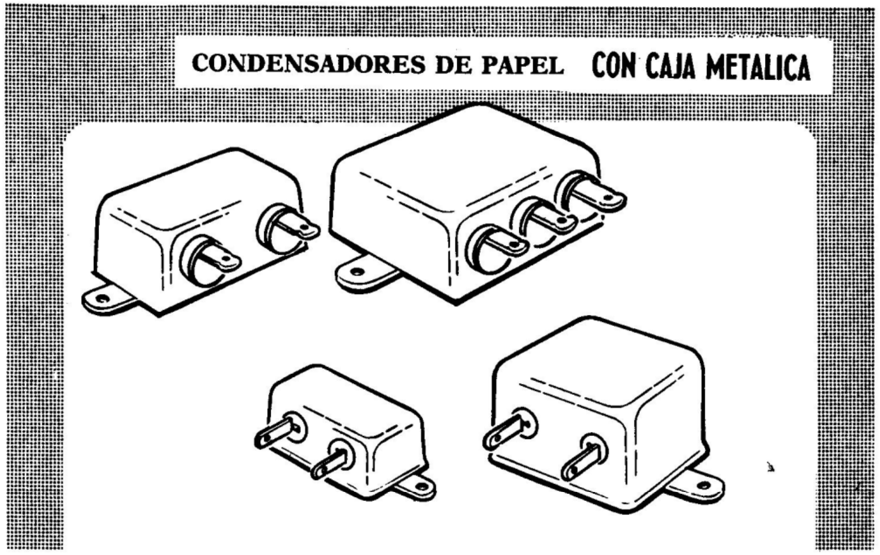


Algunos tipos de condensadores de papel se hallan protegidos por una cubierta de plástico muy duro, o encerrados en una caja metálica. Los condensadores así construidos son muy robustos y pueden ser utilizados en una gama de temperatura mucho más amplia que la de los del tipo de cubierta de cartón. La cera utilizada en el tipo tubular de cartón se funde a altas temperaturas, y escapa a través de los extremos abiertos del tubo de cartón.

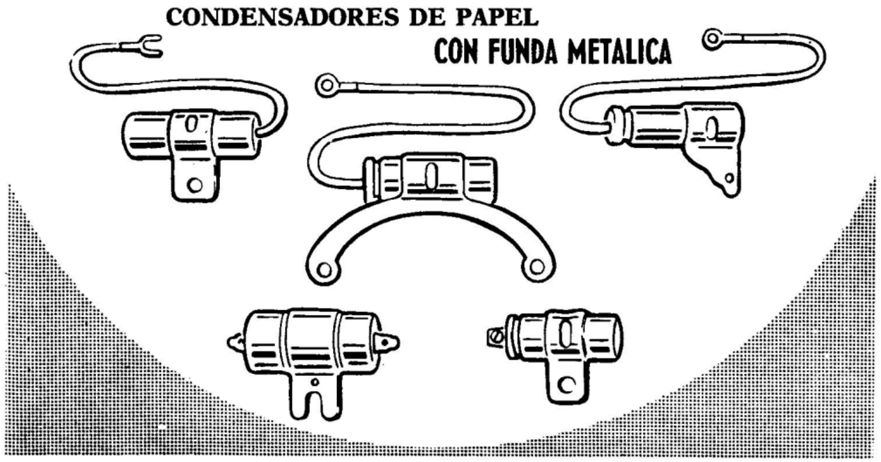


Tipos de condensadores *(continuación)*

En los condensadores de papel más grandes los cartuchos de papel están herméticamente encerrados en una envolvente metálica. Esta envolvente se utiliza a veces como terminal del condensador al estar una de sus placas conectada a la envolvente, y otras actúa como una pantalla contra interferencias eléctricas. Muy frecuentemente se utiliza un solo terminal común para varios condensadores encerrados en una misma caja metálica.



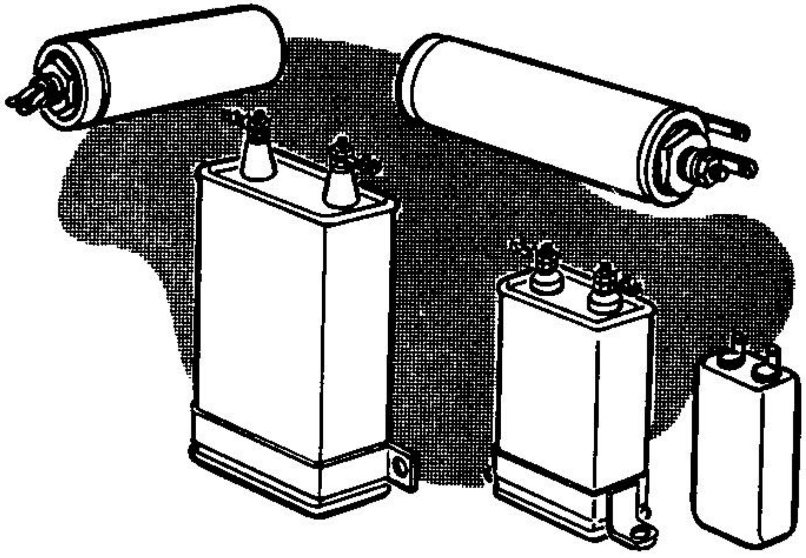
Los condensadores utilizados en los sistemas de encendido de automóviles son del tipo de cartucho de papel y caja metálica, sirviendo la caja como pantalla y también como conexión terminal. Las cajas metálicas son necesarias a causa de que en los equipos eléctricos de coche los condensadores deben ser excepcionalmente robustos y capaces de soportar los efectos de trepidaciones mecánicas y de los agentes atmosféricos.



Tipos de condensadores *(continuación)*

Los condensadores de papel utilizados en circuitos de tensión elevada (600 voltios y más) están impregnados con aceite o sumergidos en aceite. El recipiente metálico que los contiene está herméticamente cerrado, utilizándose varios tipos de conexiones terminales.

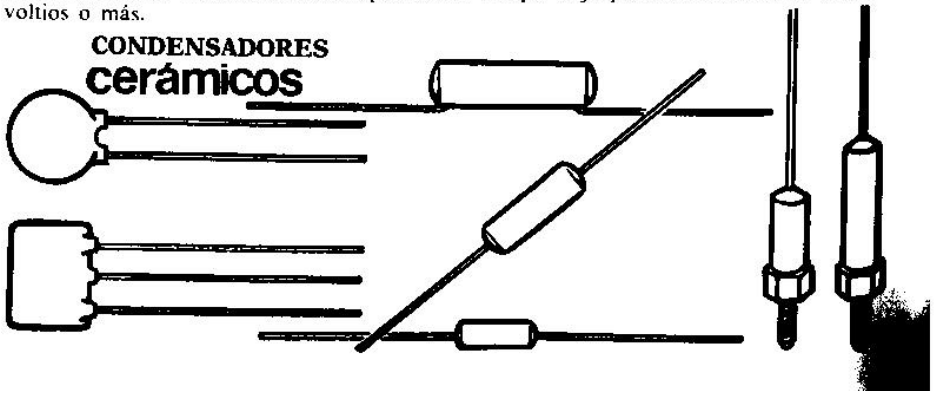
CONDENSADORES PAPEL-ACEITE PARA TENSIONES ELEVADAS



Un tipo recientemente creado de condensadores, de tamaño extremadamente pequeño —tanto fijos como variables— utiliza material cerámico como dieléctrico y las placas están formadas por un depósito de película de plata sobre el dieléctrico. Los condensadores cerámicos cubren ordinariamente la gama de capacidades comprendida entre 1 pF y 0,01 μF. Se fabrican diferentes tipos, siendo el más común los que tienen formas de disco y tubular. Los condensadores cerámicos variables tienen una placa fija de película de placa y una placa metálica móvil que está revestida de plata.

Los condensadores cerámicos tienen un dieléctrico el cual garantiza el aislamiento contra tensiones superiores a 2.000 voltios, pero, siendo pequeños, ocupan poco espacio. Son utilizados en muchos circuitos especiales en los que hay aplicadas tensiones de 10.000 voltios o más.

CONDENSADORES cerámicos



Tipos de condensadores *(continuación)*

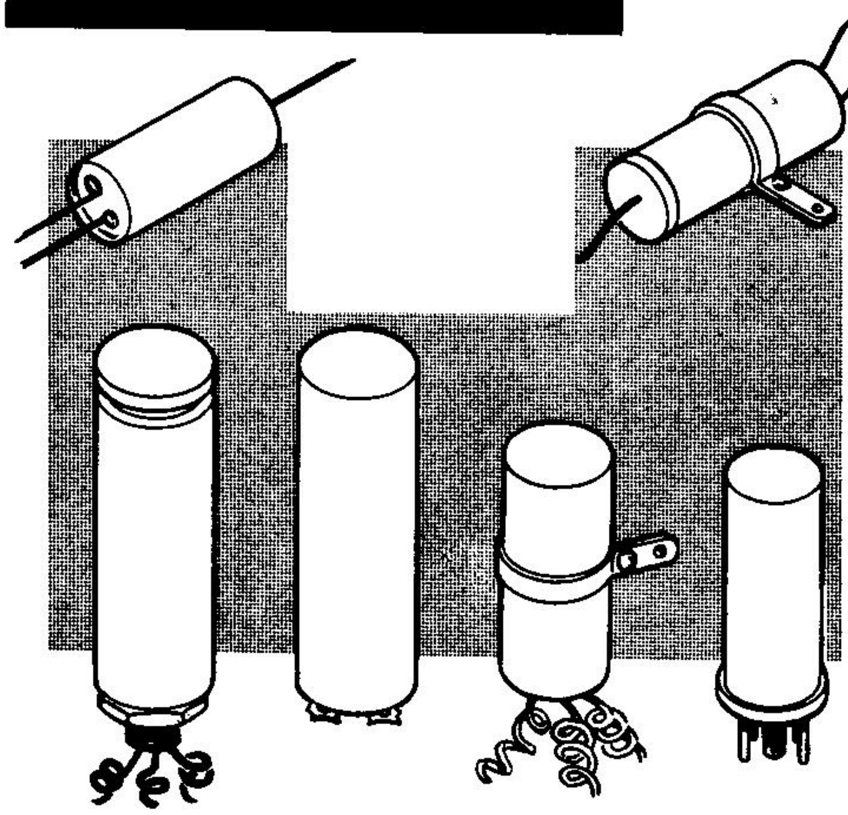
Para valores de capacidad mayores que 1 μF, el tamaño de un condensador de papel o de mica llega a ser excesivo, por lo que en lugar de ellos, generalmente se utilizan condensadores electrolíticos para valores comprendidos entre 1 y 1.000 μF.

A diferencia de los otros tipos de condensadores, el electrolítico está «polarizado». Si se le conecta con polaridad equivocada, se perfora y actúa como cortocircuito.

En los circuitos de c.a. se utiliza algunas veces, por ejemplo, para arranque de motores, un tipo «reversible» o no polarizado.

Los condensadores electrolíticos se construyen en una amplia variedad de formas y dimensiones, utilizando cajas de cartón o metálicas, y varios tipos de terminales de conexión. Recuerde que, a no ser que el condensador electrolítico sea del tipo reversible —lo que permite utilizarlo con c.a.— debe tener la precaución de conectarlo sólo en un circuito de c.c. y observar la correcta polaridad.

CONDENSADORES ELECTROLITICOS



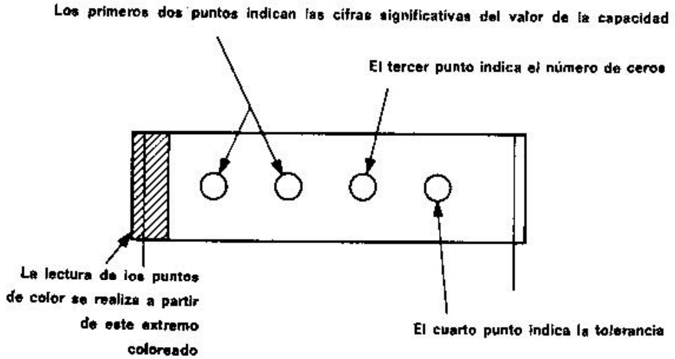
Código de color de los condensadores

El valor de capacidad y la tensión nominal de la mayoría de condensadores están impresos o estampados en la caja o cubierta protectora del condensador, conjuntamente con las marcas de polaridad en el caso de los condensadores electrolíticos. La tensión nominal marcada en las cubiertas protectoras de los condensadores se refiere a la máxima tensión de c.c. que se puede aplicar entre los terminales sin riesgo de perforación del aislamiento dieléctrico. En algunos condensadores también se indica la tensión de prueba, que es mayor que la tensión de trabajo de c.c. Algunos condensadores pequeños están especificados mediante un código de colores para indicar el valor de su capacidad y otros datos concernientes al condensador. Los colores utilizados para indicar las cifras significativas y el número de ceros que expresan la capacidad en picofaradios (pF) están indicados en la tabla de abajo. Verá que los colores y los números se corresponden con los utilizados en el código de colores de resistores.

Color	Número	Color	Número
Negro	0	Verde	5
Marrón	1	Azul	6
Rojo	2	Violeta	7
Naranja	3	Gris	8
Amarillo	4	Blanco	9

La posición relativa de estas marcas y de las otras utilizadas para los otros datos varía con el tipo de condensador.

Condensadores con dieléctrico cerámico



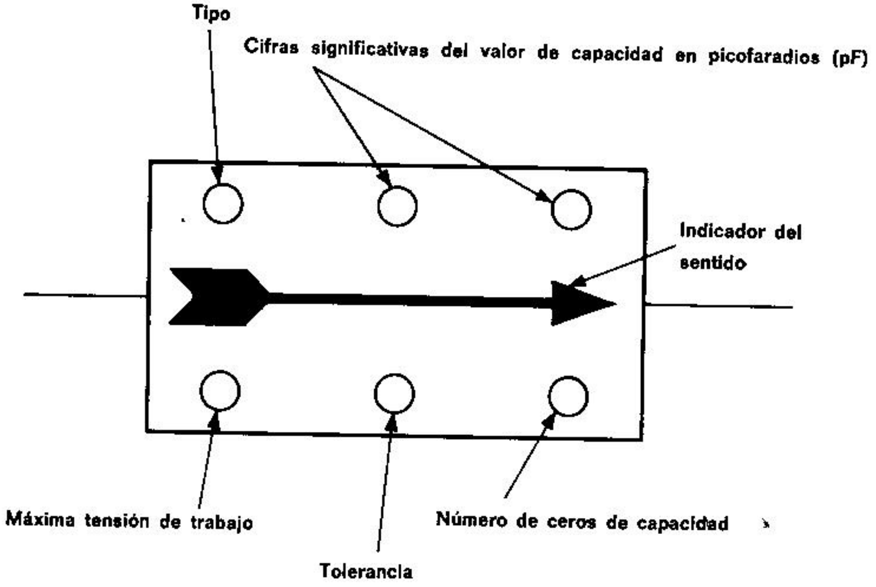
Las tolerancias también se indican mediante colores, de acuerdo con la tabla siguiente.

Color	Tolerancia	
	10 pF o menos	Más de 10 pF
Negro	± 2 pF	± 20 %
Marrón	± 0,1 pF	± 1 %
Rojo	—	± 2 %
Naranja	—	± 2,5 %
Verde	± 0,5 pF	± 5 %
Gris	± 0,25 pF	—
Blanco	± 1 pF	± 10 %

Código de color de los condensadores *(continuación)*

Condensadores con dieléctrico de mica

La posición de los colores empleados para indicar el valor de capacidad y los otros datos está representada en la siguiente figura.



Los colores empleados para indicar el tipo, la tolerancia y la tensión de trabajo se dan en la tabla de abajo.

Color	Tipo	Tolerancia	Tensión máxima de trabajo
Rojo	Metalizado	± 2 %	350 V
Verde	Hoja	—	750 V
Blanco	—	—	2000 V
Oro	—	± 5 %	—
Plata	—	± 10 %	—
Negro o Ninguno	—	± 20 %	—

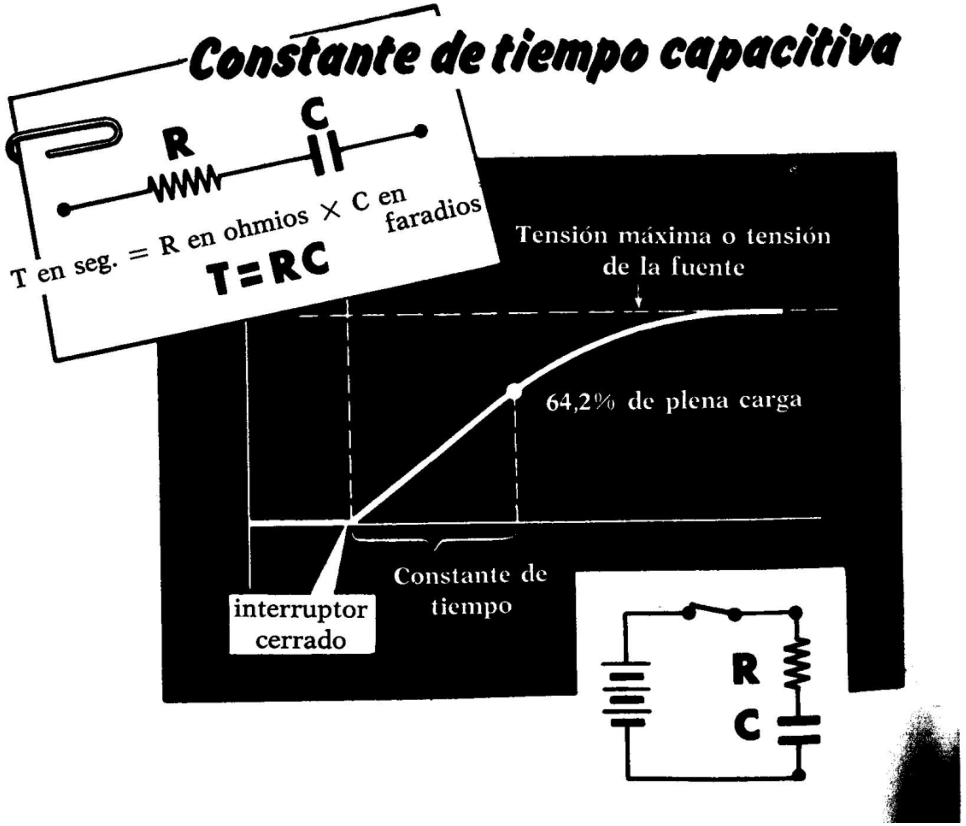
Si el condensador no tiene flecha que indique el sentido en que se deben leer los puntos, se coloca el condensador de forma que pueda leerse normalmente la marca de fábrica del fabricante y se leen los puntos de izquierda a derecha.

Constante de tiempo capacitiva

Cuando se aplica una tensión entre los terminales de un circuito que posee capacidad, la tensión en bornes del condensador no es instantáneamente igual a la tensión aplicada a los terminales del circuito. Ya ha estudiado Vd. que tiene que transcurrir algún tiempo para que las placas de un condensador alcancen su plena carga, y que la tensión entre las placas aumenta hasta ser igual a la tensión aplicada al circuito de acuerdo con una curva análoga a la curva de intensidad correspondiente a un circuito inductivo.

Cuanto mayor es la resistencia del circuito, más tiempo necesita el condensador para alcanzar su máxima tensión, ya que la resistencia del circuito supone una oposición a la corriente de carga del condensador, disminuyendo su intensidad y tardando más tiempo en recibir toda su carga eléctrica.

El tiempo que el condensador requiere para cargarse completamente depende del producto de la resistencia del circuito y la capacidad. Este producto *RC* —resistencia por capacidad— es la «constante de tiempo» del circuito capacitivo. La constante de tiempo *RC* da el tiempo en segundos necesario para que la tensión en bornes del condensador alcance el 63,2 por ciento de su máximo valor. Análogamente, la constante de tiempo *RC* es igual al tiempo, en segundos, necesario para que el condensador se descargue hasta el 63,2 por ciento de su plena carga.



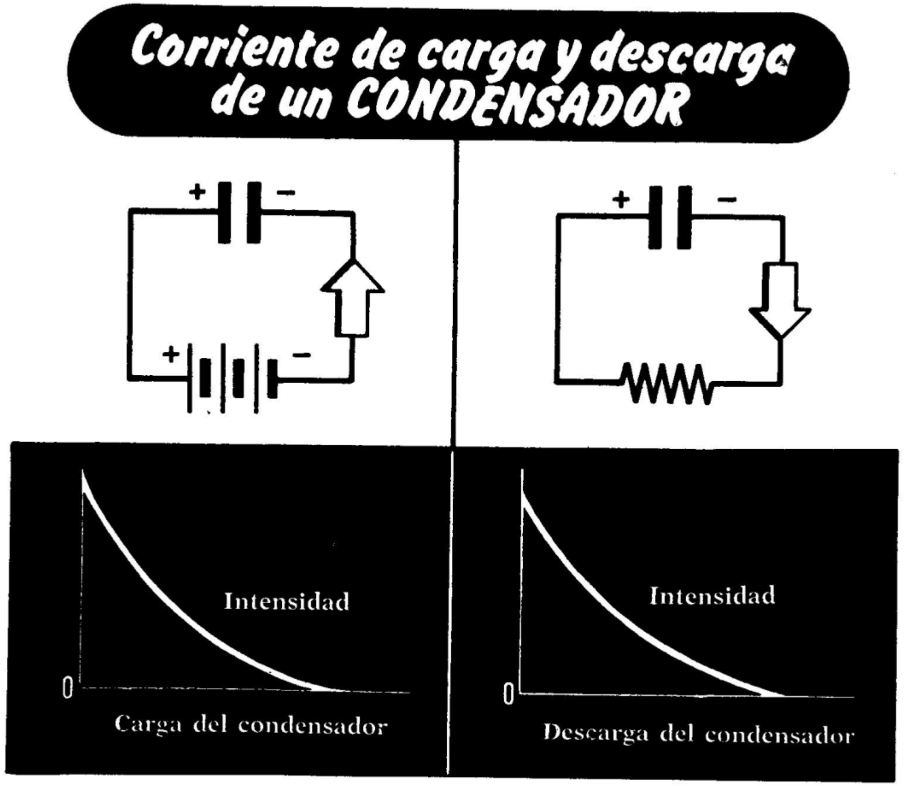
Reactancia capacitiva

La reactancia capacitiva es la oposición a la corriente que presenta la capacidad de un circuito. Cuando se utiliza una fuente de c.c., sólo pasa corriente durante la carga o descarga del condensador. Puesto que en un circuito capacitivo no circula permanentemente la corriente continua, la reactancia capacitiva para esta corriente se considera infinita. La corriente alterna varía continuamente de valor y polaridad, por lo que el condensador se carga y descarga incesantemente, de lo que resulta una corriente alterna permanente en el circuito y un valor finito de reactancia capacitiva.

Las corrientes de carga y descarga de un condensador tienen inicialmente una intensidad máxima que disminuye hasta cero cuando el condensador se carga o descarga completamente. En un condensador en carga, las placas descargadas presentan inicialmente poca oposición a la corriente de carga, pero a medida que se cargan, presentan cada vez más oposición, por lo que se reduce la intensidad de la corriente.

Análogamente, la corriente de descarga es de gran intensidad cuando comienza la descarga, a causa de la tensión del condensador cargado; pero cuando el condensador se descarga, la tensión en sus bornes disminuye, por lo que la intensidad de la corriente es cada vez menor.

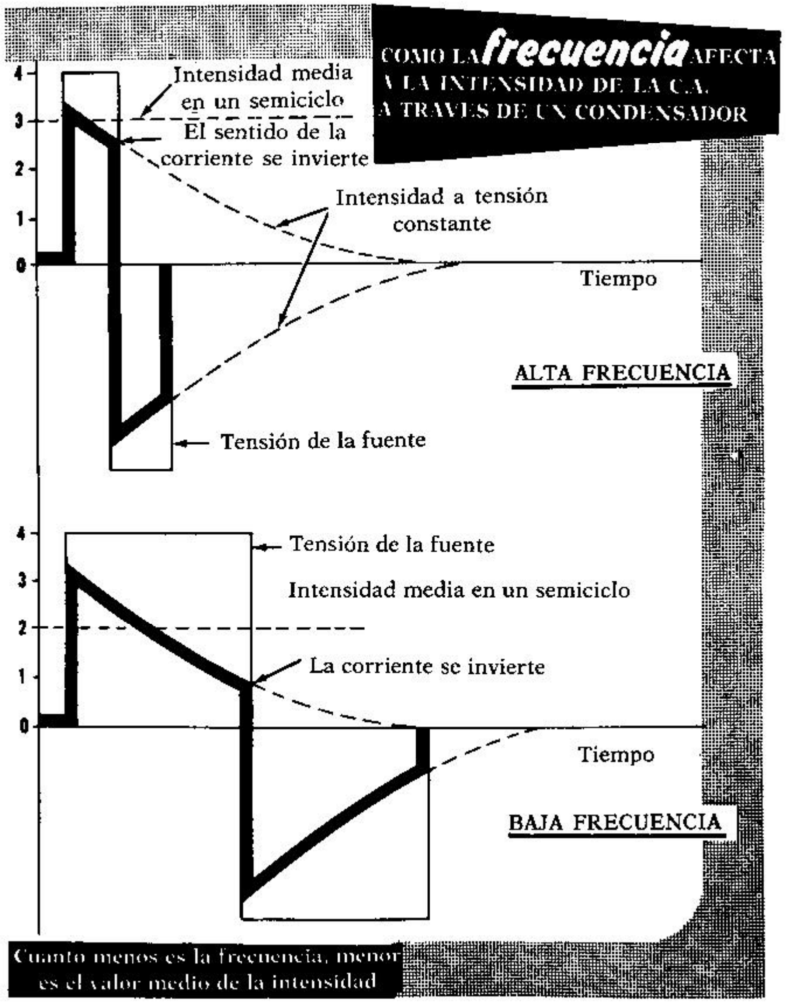
Puesto que tanto las corrientes de carga como de descarga son de más intensidad al principio de la carga o de la descarga del condensador, se deduce que el valor medio de la intensidad aumentará si la polaridad se invierte incesantemente con mayor rapidez.



Reactancia capacitiva *(continuación)*

Suponga que en el circuito de la página 3.105 fuese posible conmutar las conexiones de la batería muy rápidamente de modo que el condensador se cargase alternativamente en ambos sentidos.

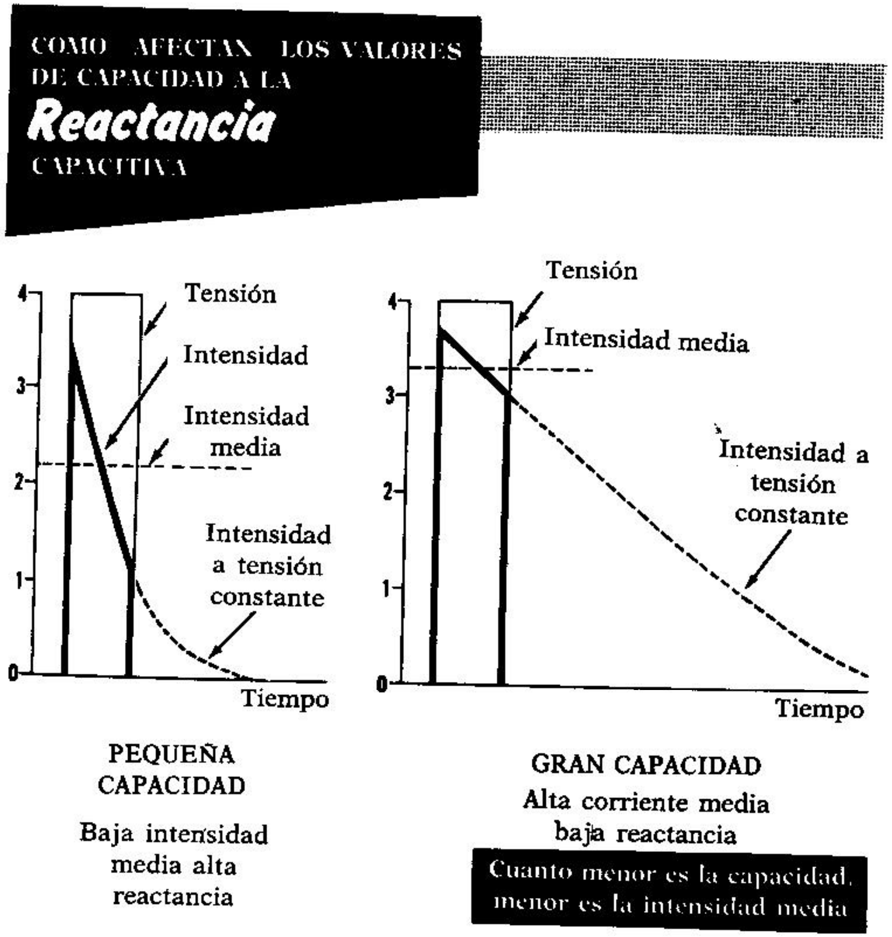
Para un valor dado de capacidad, la intensidad de la corriente en el circuito depende de la frecuencia con que se efectúa la conmutación. Cuanto más alta sea la frecuencia, mayor es la intensidad de la corriente, ya que la corriente de carga se invertirá en ambos sentidos antes de que tenga tiempo de disminuir hasta un valor bajo. Por el contrario, si la velocidad de conmutación, es decir, la frecuencia es baja, la intensidad disminuirá hasta un valor bajo antes que se produzca la inversión de la polaridad por lo que la intensidad media de la corriente será menor.



De lo dicho se deduce, que para un valor dado de capacidad, la intensidad de corriente en un circuito de c.a. depende de la frecuencia de la tensión.

Reactancia capacitiva *(continuación)*

Comparando las curvas de corriente de carga para diferentes valores de capacidad, verá que cuanto mayor es la capacidad, más tiempo se mantiene la intensidad de la corriente en un valor alto. Así, si la frecuencia es la misma, la intensidad media de la corriente a través de un condensador de gran capacidad será mayor que a través de uno de capacidad pequeña. Sin embargo, para que esto sea válido, las resistencias de los circuitos tienen que ser iguales, a causa de que la curva de carga de un condensador depende de la constante de tiempo *RC* del circuito.



La intensidad de la corriente en un circuito capacitivo, suponiendo que no varíe la resistencia, aumenta cuando aumenta la frecuencia o la capacidad. Así, la reactancia capacitiva —oposición al paso de la corriente a través de una capacidad— disminuirá cuando la frecuencia, la capacidad o ambas a la vez aumenten.

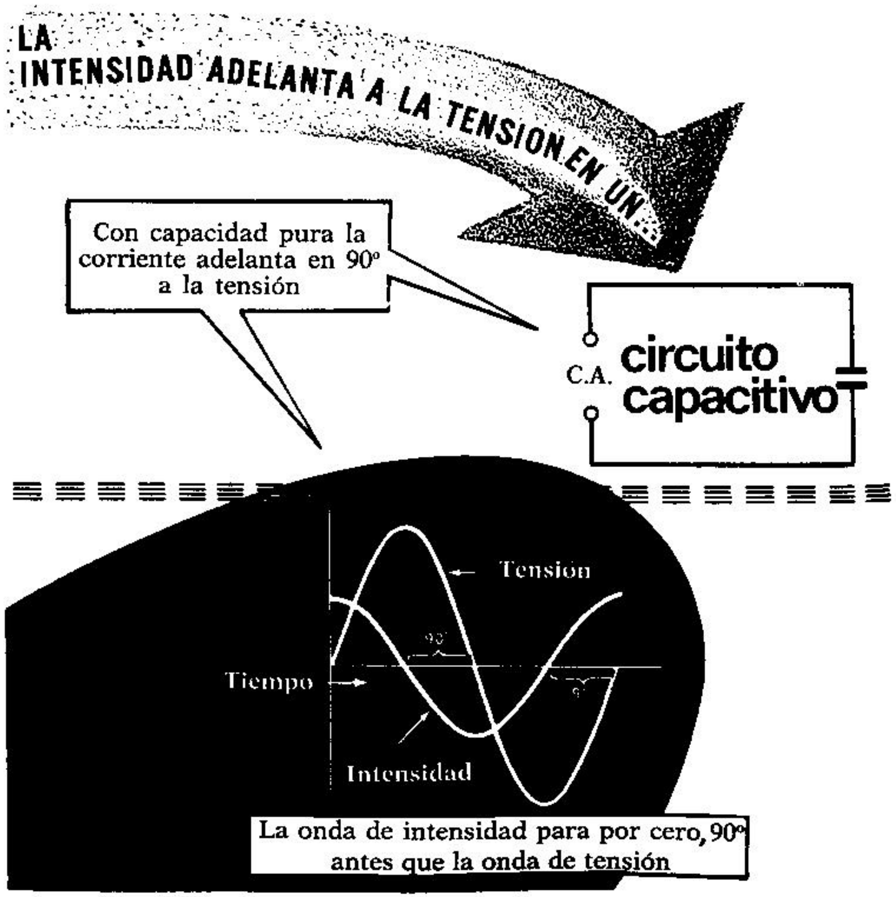
La fórmula que se emplea para obtener la reactancia capacitiva es $X_c = 1/2\pi fC$. En esta fórmula, X_c es la reactancia capacitiva, f es la frecuencia en hertzios, C es la capacidad en faradios, y 2π es un número constante (6,28). Como X_c representa la oposición o resistencia al paso de la corriente, se la expresa en ohmios.

Reactancia capacitiva *(continuación)*

La relación de fase entre las ondas de intensidad y de tensión en un circuito capacitivo al cual se aplica una tensión alterna, es exactamente la opuesta a la de un circuito inductivo. En un circuito inductivo puro la onda de intensidad se retarda 90 grados con respecto a la tensión, mientras que en un circuito capacitivo puro la onda de intensidad se adelanta a la tensión en 90 grados.

En un circuito teórico de c.a. con capacidad pura y sin resistencia, la tensión entre los terminales del condensador existe sólo una vez iniciada la corriente que carga las placas. En el instante en que comienza a cargarse el condensador, la tensión entre las placas es cero y la intensidad de la corriente es máxima. Al aumentar la carga del condensador, la intensidad de la corriente disminuye hacia cero mientras la tensión aumenta hacia su valor máximo. Cuando el condensador alcanza su plena carga, la intensidad es nula y la tensión es máxima. En la descarga, la intensidad comienza en cero y aumenta hasta el máximo en sentido opuesto, mientras la tensión disminuye desde el máximo hasta cero.

De esto se deduce que, en c.a., la intensidad adelanta a la tensión en 90 grados, o, lo que es lo mismo, la onda de tensión está retardada 90 grados con respecto a la intensidad.

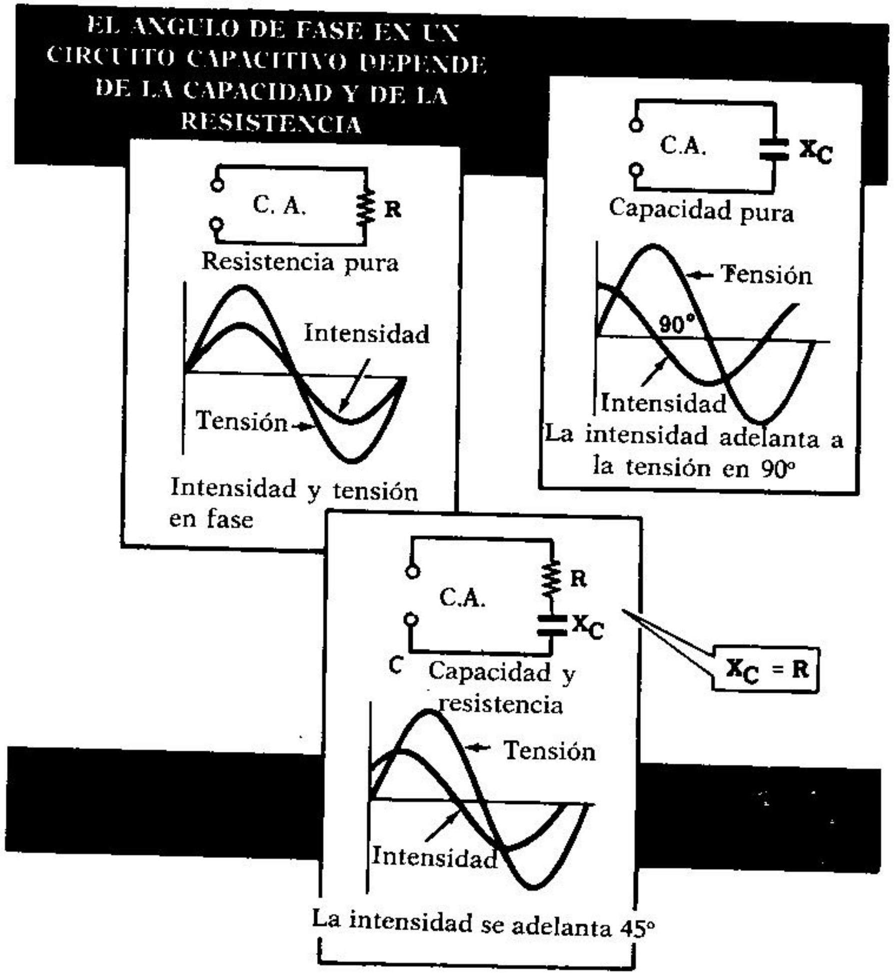


Reactancia capacitiva *(continuación)*

La resistencia afecta a los circuitos capacitivos de la misma manera que afecta a los circuitos inductivos. Recuerde que, en un circuito inductivo que contiene inductancia y resistencia, la onda de intensidad está retardada con respecto a la intensidad en un ángulo comprendido entre cero y 90 grados, dependiendo de la relación entre la reactancia inductiva y la resistencia. En un circuito capacitivo puro, la intensidad adelanta 90 grados a la tensión, pero si hay resistencia y capacidad en el circuito, el adelanto —o «ángulo de fase» como se le denomina— depende de la relación entre la reactancia capacitiva y la resistencia.

El ángulo de fase se puede calcular por la fórmula: $\operatorname{tg} \phi = X_c/R$, siendo ϕ el ángulo de fase.

Si la reactancia capacitiva y la resistencia del circuito son iguales, tienen un efecto igual sobre el ángulo de adelanto, y esto dará por resultado un ángulo de fase en adelanto de 45 grados. La onda de intensidad adelanta entonces a la onda de tensión en 45 grados, como abajo se muestra.



Potencia en un circuito capacitivo

En un circuito capacitivo, lo mismo que en un circuito inductivo, la potencia real consumida es menor que la potencia aparente del circuito. La forma de onda de potencia se obtiene igualmente multiplicando los valores correspondientes de tensión e intensidad para obtener los valores instantáneos de potencia.

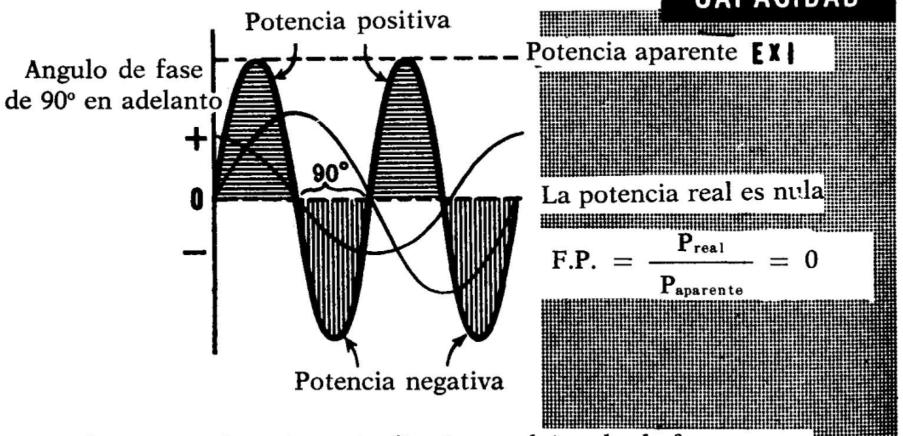
La forma de onda de un circuito de c.a. que sólo posee capacidad, está representada en la figura. Lo mismo que la onda de potencia de un circuito inductivo puro, su eje es el mismo que el de tensión e intensidad, mientras su frecuencia es doble. En este circuito, el ángulo de fase entre la onda de intensidad y la onda de tensión es 90 grados, y la potencia negativa es igual a la potencia positiva.

La fórmula del factor de potencia en un circuito capacitivo es la misma que en un circuito inductivo.

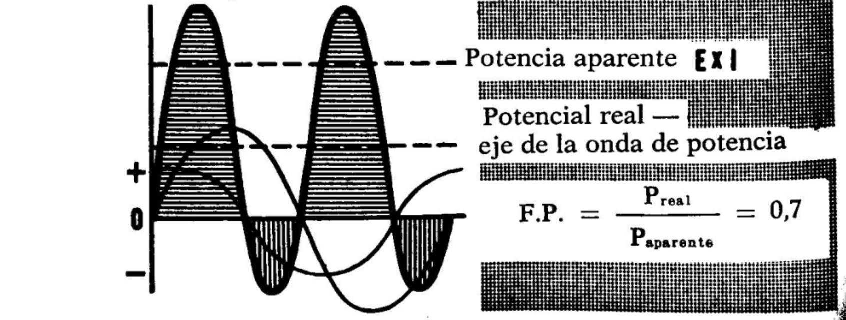
Cuando se añade resistencia en un circuito capacitivo, el ángulo de fase disminuye, y la potencia positiva se hace mayor que la potencia negativa. Debido a que la tensión y la intensidad están desfasadas, la potencia en vatios no es igual a la potencia aparente, y el factor de potencia está comprendido entre cero y la unidad.

ONDA DE POTENCIA

DE UN CIRCUITO QUE CONTIENE SOLO **CAPACIDAD**



El aumento de resistencia disminuye el ángulo de fase — la potencia real aumenta

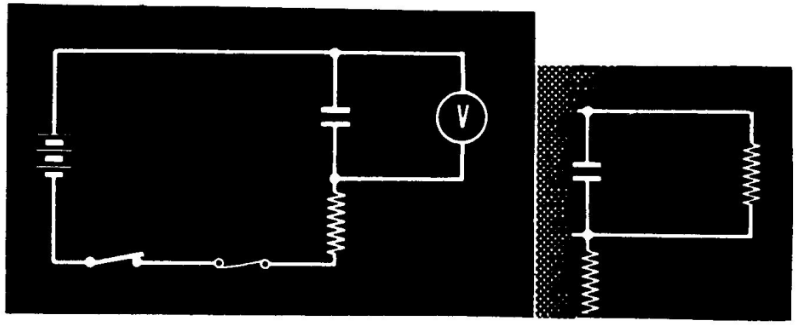


EXPERIMENTO — Constante de tiempo RC

En un circuito que posee resistencia y capacidad, la intensidad de la corriente de carga del condensador está limitada por la resistencia, y la tensión entre las placas del condensador se desarrolla a una velocidad determinada por la constante de tiempo RC.

No es posible utilizar un voltímetro para observar el aumento de la tensión cuando se carga el condensador, a causa de que las placas de éste están conectadas entre sí a través de la resistencia del instrumento, entonces el circuito ya no sería uno de C y R en serie. (Vea la primera figura de abajo, a la derecha.)

UN VOLTIMETRO CONECTADO EN PARALELO CON UN CONDENSADOR ACTUA COMO **RESISTOR**

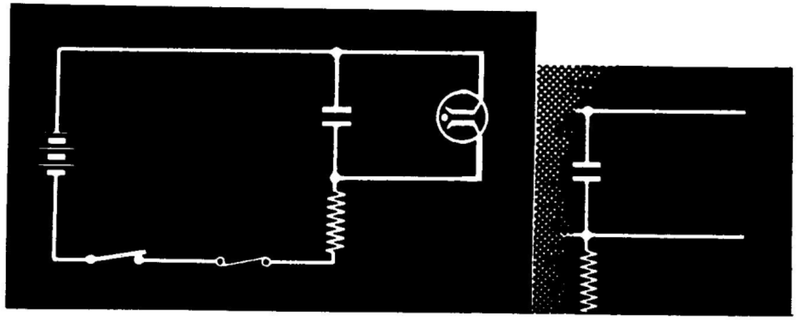


Para demostrar experimentalmente cómo se desarrolla la tensión entre las placas de un condensador necesitará, pues, un dispositivo que indique la tensión, pero que no conecte entre sí las placas del condensador. Una lámpara de neón sirve para esto, porque constituye un circuito abierto hasta que la tensión entre sus terminales alcanza un valor predeterminado. Cierto es que la lámpara no mide exactamente la tensión, ni muestra cómo se desarrolla realmente la tensión cuando se carga el condensador, pero, conectada en paralelo con el condensador que se está cargando, muestra que el desarrollo de la tensión entre las placas del condensador se realiza con retardo.

La tensión de carga se aplica al circuito del condensador y la lámpara no se enciende hasta que la tensión entre las placas del condensador alcanza la tensión de cebado de la lámpara.

HASTA QUE SE ALCANZA SU TENSION DE CEBADO

UNA LAMPARA DE NEON ES UN CIRCUITO ABIERTO



EXPERIMENTO – - Constante de tiempo RC (continuación)

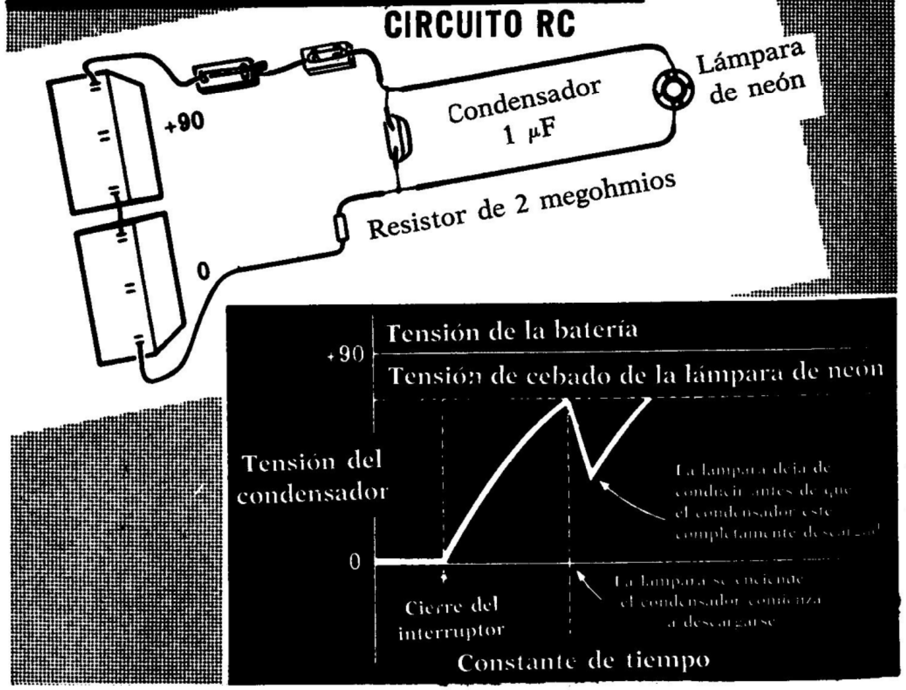
Para efectuar este experimento conecte en serie un interruptor, un fusible, un condensador de 1 microfaradio y un resistor de 2 megohmios entre los terminales de una batería de 90 voltios formada por pilas secas. Luego conecte una lámpara de neón con una tensión de cebado de 70 voltios, aproximadamente, entre los terminales del condensador. El circuito está ilustrado abajo.

Cuando Vd. cierre el interruptor, observe que, después de un retardo de algunos momentos, la lámpara de neón centellea, indicando que en ese instante la tensión entre los terminales del condensador ha alcanzado el valor de la tensión de cebado de la lámpara.

Observe que la lámpara de neón continúa centelleando, o sea, produciendo destellos, a intervalos de un segundo aproximadamente. Cada vez que el condensador se carga hasta una tensión igual a la tensión de cebado de la lámpara, ésta se enciende y al mismo tiempo constituye un camino para la corriente entre las placas del condensador, que posibilita la descarga del mismo.

Cuando el condensador se descarga a través de la lámpara encendida, su tensión disminuye hasta un valor que es demasiado bajo para que la lámpara continúe encendida; ésta deja de conducir y nuevamente constituye un circuito abierto, por lo que el condensador empieza a cargarse de nuevo, repitiéndose el ciclo.

OBSERVANDO EL RETARDO DE TIEMPO DE UN CIRCUITO RC

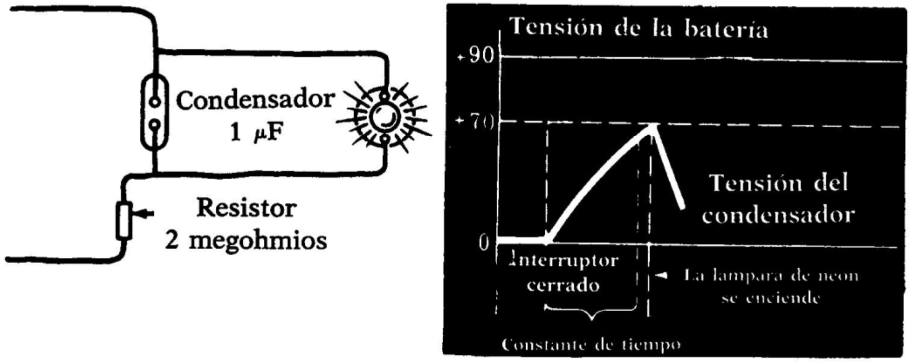


EXPERIMENTO — Constante de tiempo RC (continuación)

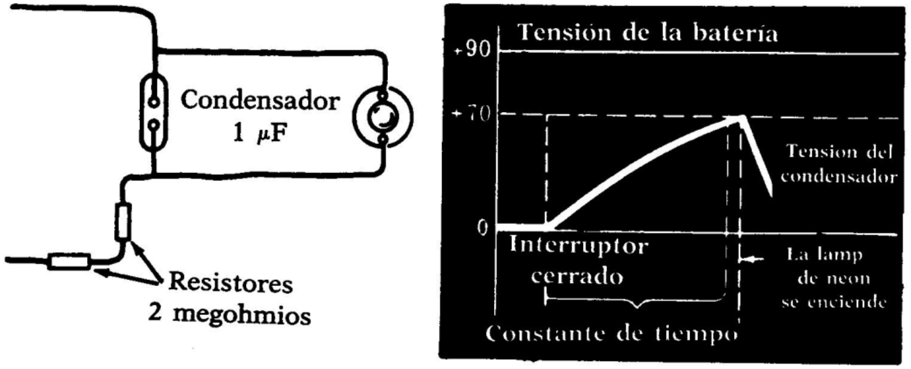
Para observar el efecto de la resistencia sobre el tiempo necesario para que el condensador se cargue, añada resistores en serie con el resistor de dos megohmios. Observe que, cuando la resistencia se duplica, el tiempo necesario para que se cargue el condensador también se duplica. Vd. ya sabe que la constante de tiempo RC expresa el tiempo en segundos necesario para que la tensión de un condensador en carga alcance, el 63,2 por ciento de la tensión aplicada al circuito. El valor de cebado de la lámpara de neón es aproximadamente 70 voltios, o casi el 75 por ciento de la tensión total de la batería utilizada. Por tanto, se podría presumir que el intervalo entre los destellos de la lámpara de neón será aproximadamente igual a la constante de tiempo (RC) del circuito.

No obstante, existe una diferencia entre la constante de tiempo calculada y la constante de tiempo observada. Si la resistencia del circuito es 4 megohmios, de acuerdo con la constante de tiempo calculada, la lámpara de neón debe producir destellos 15 veces por minuto (4 MΩ × 1 μF = 4 seg); pero realmente se verán 30 destellos por minuto. La razón de esta diferencia es que el condensador no se descarga por completo cada vez que se enciende la lámpara.

Cuando conecte los resistores adicionales en serie con el resistor de dos megohmios, compare el tiempo necesario para que se encienda la lámpara con la constante de tiempo calculada del circuito.

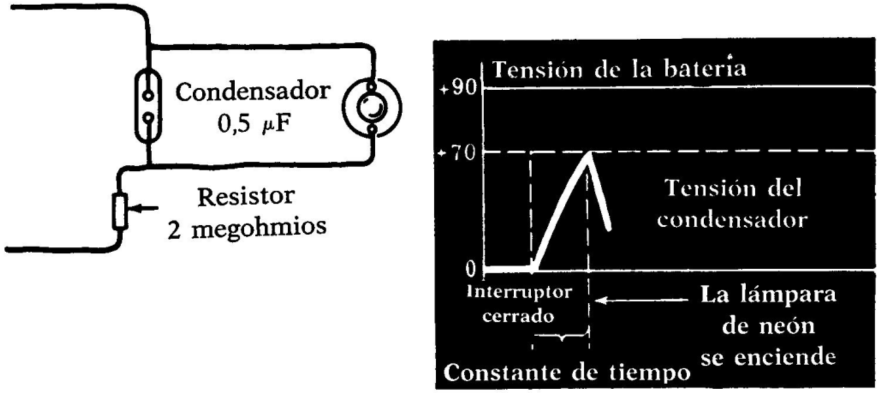


UN CAMBIO DE LA RESISTENCIA CAMBIA LA CONSTANTE DE TIEMPO RC

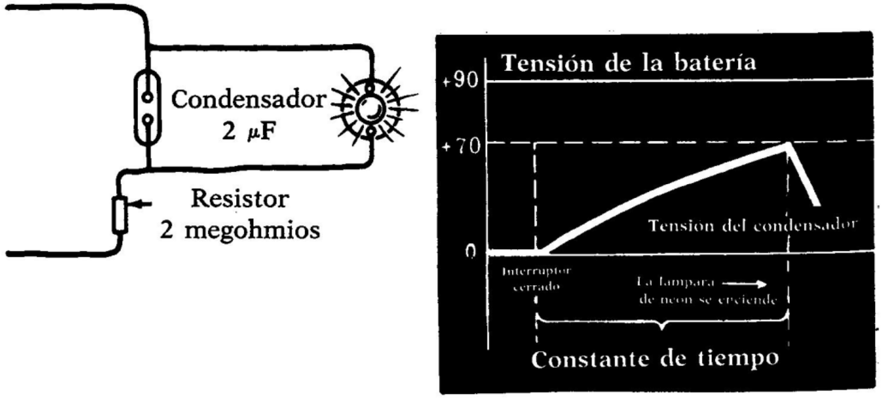


EXPERIMENTO — Constante de tiempo RC (continuación)

A continuación retire todos los resistores excepto uno de 2 megohmios y utilice condensadores de distintas capacidades. Observe que los cambios de valor de capacidad producen el mismo efecto sobre la constante de tiempo del circuito que los cambios de resistencia. Cuando se emplean valores bajos de capacidad, la constante de tiempo es más corta y los destellos se producen tan rápidamente que la luz se ve como si fuese permanente en vez de intermitente o por destellos.



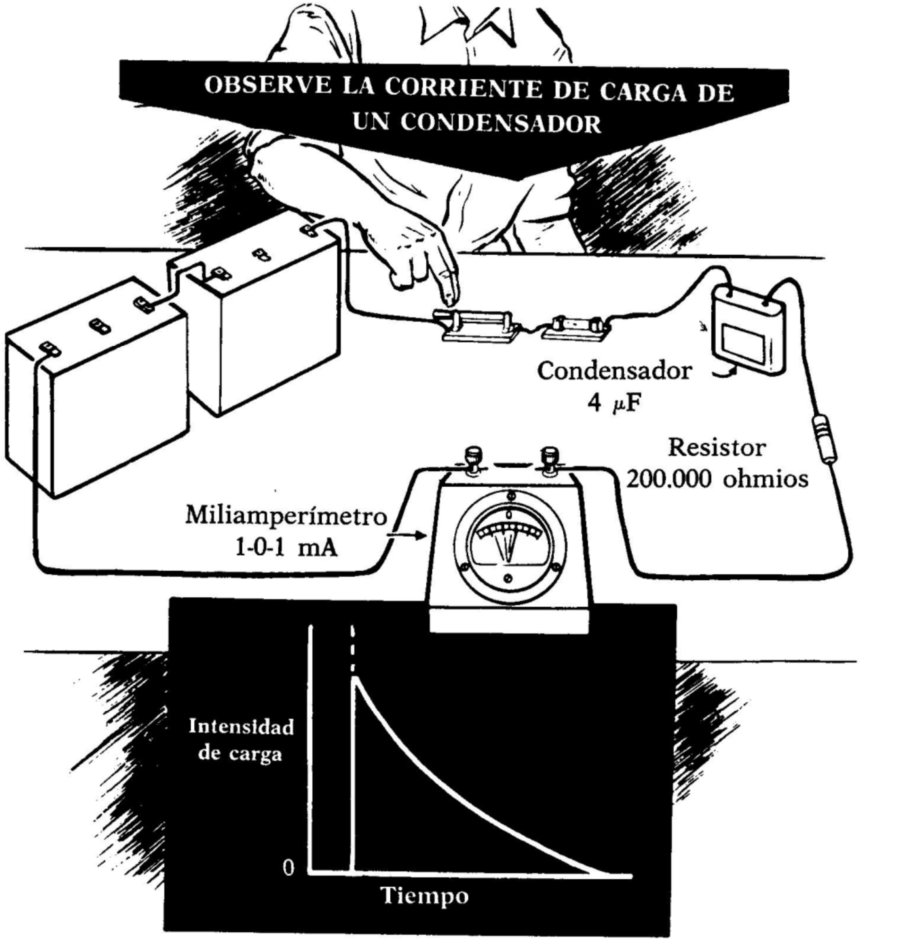
EL CAMBIO DE LA CAPACIDAD CAMBIA LA CONSTANTE DE TIEMPO RC



EXPERIMENTO — Constante de tiempo RC (continuación)

Para observar la intensidad de la corriente cuando se carga un condensador, conecte un interruptor, un fusible, un condensador de 4 μF, un resistor de 200 kΩ y un miliamperímetro de 1-0-1 mA, en serie entre los terminales de una batería de 90 voltios formada por pilas secas. El circuito puede verlo en la figura.

En el momento en que cierre el interruptor, verá que la lectura del medidor indica que pasa una corriente de cierta intensidad y, cuando se carga el condensador, la lectura del medidor disminuirá hasta cero. Observe que, una vez que la intensidad de la corriente se anula, (indicando la plena carga en las placas del condensador) la apertura y el cierre del interruptor no hace que aumente la intensidad de la corriente. Si entonces abre el interruptor y descarga el condensador cortocircuitando sus terminales con el destornillador, cuando el interruptor esté cerrado otra vez, el medidor indicará una corriente de carga.



Cambiando los valores de los condensadores verá que la corriente circula durante más tiempo cuando se cargan los condensadores de más capacidad. Observe que, con pequeños valores de capacidad, el tiempo necesario para cargarlos es tan corto que es difícil leer la intensidad indicada en el miliamperímetro.

EXPERIMENTO — Reactancia capacitiva

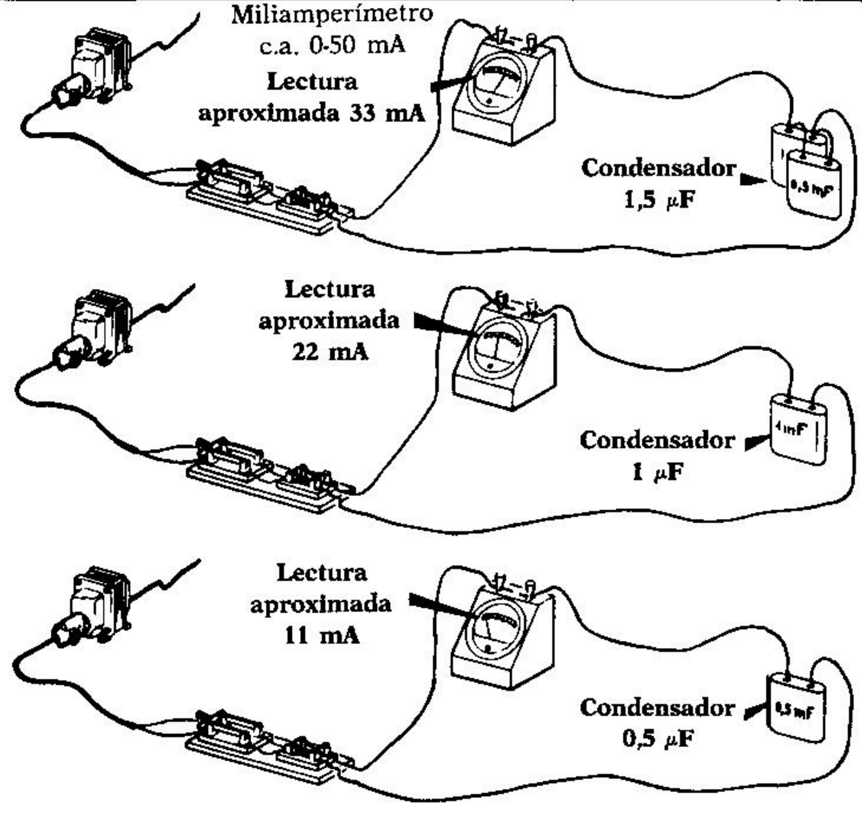
Ya ha estudiado que la corriente alterna puede circular por un circuito capacitivo y que la oposición a la corriente en este circuito depende de la capacidad, cuando la frecuencia permanece constante.

Puede Vd. confirmar esto, conectando un interruptor, un fusible, un miliamperímetro de 0-50 mA y un condensador de 1,5 μF entre los terminales del secundario de un transformador reductor, 240 a 60 voltios. La capacidad de 1,5 μF se obtiene conectando en paralelo un condensador de 1 μF y uno de 0,5 μF. El circuito está ilustrado abajo.

Para ver el efecto de la variación del valor de capacidad sobre la oposición que presenta a la corriente alterna, reemplace primero el condensador de 1,5 μF con otro de 1 μF y luego con uno de 0,5 μF. (Tenga la precaución de abrir previamente el interruptor y descargar el condensador con un destornillador cada vez que lo cambie.)

Verá que, cuando disminuya el valor de la capacidad, también disminuirá la intensidad de la corriente. Esto demuestra que la oposición a la corriente (reactancia capacitiva) aumenta siempre que disminuye la capacidad y viceversa.

VARIACION DE LA REACTANCIA CAPACITIVA CUANDO CAMBIA LA CAPACIDAD . . .



Defectos de los condensadores

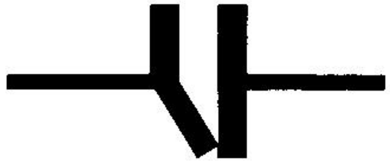
Los condensadores se utilizan en los circuitos electrónicos para muchas finalidades, en las que se hace uso de sus propiedades especiales. Por ejemplo, cuando tiene que establecerse una conexión entre dos puntos de un circuito electrónico de manera que permita el paso de la c.a. entre los puntos, pero no deje pasar la c.c., se conecta un condensador entre ellos.

Sin embargo, si un condensador está defectuoso no cumplirá el fin para que se le ha incluido en el circuito. Por esto es necesario aprender a comprobar los condensadores sospechosos de efecto.

Los defectos de los condensadores son principalmente de dos clases —circuitos abiertos y cortocircuitos—. Los circuitos abiertos pueden ser debidos a que los terminales del condensador estén desconectados interiormente de las placas del condensador. Efectos tales como éstos pueden ser detectados midiendo la capacidad del condensador mediante el uso de un «medidor de capacidad» o «capacímetro». También se puede reemplazar el condensador sospechoso del circuito con un condensador en buen estado y comprobar su funcionamiento.

En su forma más sencilla, el «capacímetro» utiliza un principio análogo al del óhmetro. El instrumento mide la reducción de la intensidad de corriente cuando se conecta el condensador en serie con una fuente de corriente alterna de 50 hertzios, después de haber sido ajustado el instrumento para que su aguja dé la máxima desviación de la escala sin el condensador.

Circuito abierto



Cortocircuito

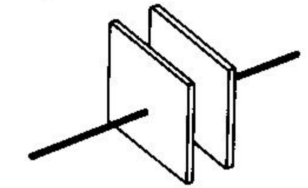
Los cortocircuitos pueden ser originados en los condensadores por daño físico o por perforación del aislamiento dieléctrico debido a sobrecalentamiento o a la aplicación de una tensión de trabajo demasiado alta.

Los cortocircuitos se pueden detectar probando la continuidad entre los terminales del condensador, para lo cual se utiliza un óhmetro. Una lectura menor de 500 kΩ, indicará que el condensador está defectuoso, salvo en el caso de condensadores electrolíticos. Estos pueden tener una «resistencia de fuga» mucho menor que 500 kΩ, y por esta razón es preferible probarlos midiendo su capacidad con un capacímetro.

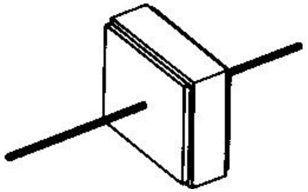
Recuerde que, cuando se efectúa esta prueba en condensadores electrolíticos pequeños, se aplica una tensión de c.c. en serie con la tensión c.a. de prueba.

Cuando pruebe los condensadores variables recuerde que generalmente los cortocircuitos se producen cuando el eje y las placas móviles están en una determinada posición. Por consiguiente el condensador debe ser probado en todo su margen de variación.

REPASO de los condensadores y de la reactancia capacitiva

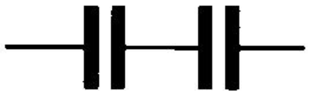


Placas de condensador. **Placas metálicas o metalizadas que pueden ser cargadas eléctricamente.**



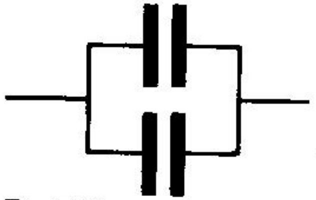
Dieléctrico. **Material aislante entre las placas de un condensador.**

Factores de la capacidad. **Los factores que determinan la capacidad de un condensador son el área de las placas, la distancia entre ellas y el material dieléctrico.**



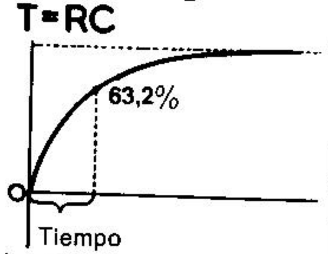
Condensadores en serie. **La capacidad de varios condensadores en serie viene dada por:**

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots$$

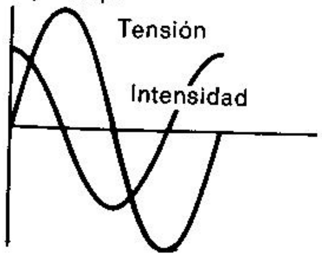


Condensadores en paralelo. **La capacidad de varios condensadores en paralelo viene dada por:**

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$$



Constante de tiempo capacitiva. **El producto *RC* que da el tiempo en segundos necesario para que un condensador alcance el 63,2 por ciento de su plena carga.**



Reactancia capacitiva. **La acción por la que la capacidad se opone al paso de la corriente alterna y hace que la corriente adelante a la tensión.**

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \text{ ohmios}$$

§ 8. INTRODUCCION A LOS CIRCUITOS SERIE DE C.A.

Ya ha estudiado las diversas maneras en que la resistencia (R), la inductancia (L) y la capacidad (C) afectan individualmente a la intensidad de la corriente, al ángulo de fase y a la potencia en los circuitos con c.a.

Ha estudiado que todo circuito eléctrico contiene una cierta cantidad de estos tres factores, R, L y C, pero que el valor de cualquiera de ellos en un circuito dado puede ser tan pequeño que sea despreciable. Si dos de ellos lo son, el circuito se compondrá únicamente de R, o sólo de C, o sólo de L, habiendo estudiado ya Vd. estos casos lo suficiente para comprenderlos.

Pero si en la práctica no puede ser despreciado ninguno de estos factores, el estudio del circuito será más complejo.

Ahora debe Vd. emprender el estudio de la parte cuatro de *Electricidad Básica* para saber cómo afectan las diversas combinaciones posibles de R, L y C —dos cualesquiera de ellas, o las tres— a los circuitos serie de c.a.

INDICE ALFABETICO

(Nota: Al final de la parte cinco hay un índice acumulativo que abarca las 5 partes)

C.A., 3.1, 3.17
— ciclo, 3.7
— forma de onda, 3.4
— frecuencia, 3.13
— instrumentos de medida, 3.18
— intensidad, 3.3
— potencia, 3.29, 3.37, 3.74
— tensión, 3.12
Capacidad, 3,75, 3.90
— factores que la afectan, 3.92
— reactancia capacitiva, 3.105, 3.118
— unidades de, 3.85
Condensadores, 3.91, 3.118
— código de colores, 3.102
— defectos en, 3.117
— en serie y en paralelo, 3.95
— tipos de, 3.96
Constante de tiempo
— en circuito capacitivo, 3.104
— en circuito inductivo, 3.53
Factor de potencia, 3.71
Formas de onda, 3.4
Frecuencia, 3.13, 3.17
Generador elemental, 3.8
Inductancia, 3.38, 3.68
— factores que la afectan, 3.46
— reactancia inductiva, 3.56
— unidades de, 3.48
Inductancia mutua, 3.49
Inductancias (bobinas), 3.46, 3.68
— defectos en, 3.67
— en serie y en paralelo, 3.61
Instrumentos de medida, c.a., tipo rectificador, 3.18
— vatímetro, 3.31
Onda senoidal, 3.6
— valor cresta a cresta, 3.14
— valor eficaz, 3.15
— valor medio, 3.20
Potencia, 3.72
— aparente, 3.72
— en circuitos de c.a., 3.29, 3.37, 3.74, 3.110
Reactancia capacitiva, 3.105, 3.118
— inductiva, 3.56
Rectificadores, 3.21
Resistencia en circuitos de c.a., 3.27
Transformadores, 3.24, 3.49
Vatímetro, 3.31